



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ULB

Trajektorienplanung und Fahrzeugführung für hochautomatisiertes Fahren auf der Autobahn

Schucker, Jeremias

(2020)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00012686>

Lizenz:



CC-BY 4.0 International - Creative Commons, Namensnennung

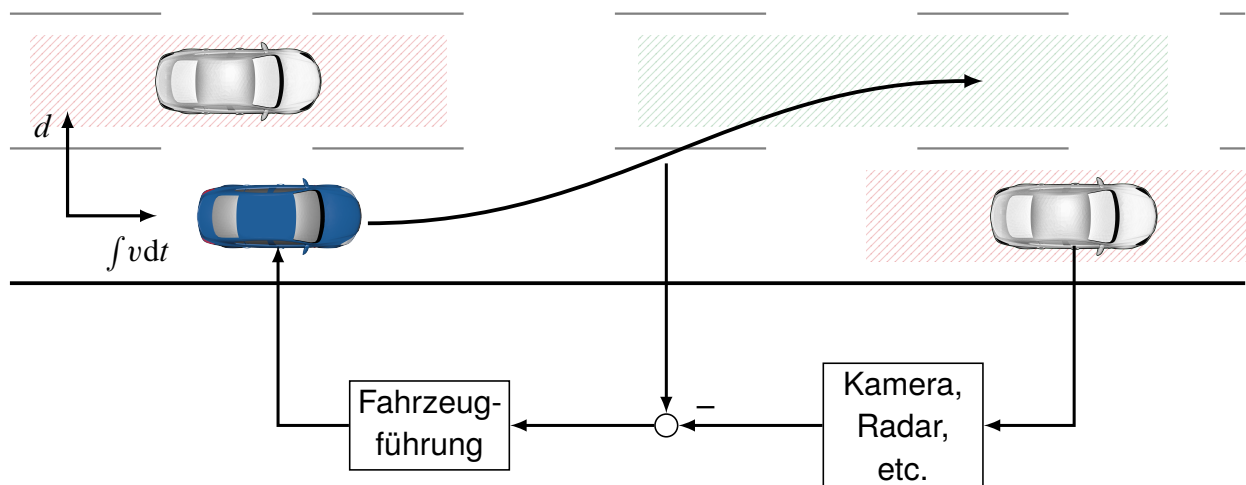
Publikationstyp: Dissertation

Fachbereich: 18 Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik

Quelle des Originals: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/12686>

Trajektorienplanung und Fahrzeugführung für hochautomatisiertes Fahren auf der Autobahn

Jeremias Schucker, M.Sc.
Doktorarbeit



Trajektorienplanung und Fahrzeugführung für hochautomatisiertes Fahren auf der Autobahn

Vom Fachbereich
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Jeremias Schucker, M.Sc.

geboren in Reutlingen

Referent: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf

Tag der Einreichung: 04. März 2020
Tag der Prüfung: 18. Juni 2020



Darmstadt 2020

Trajektorienplanung und Fahrzeugführung für hochautomatisiertes Fahren auf der Autobahn

Gemehmigte Dissertation von Jeremias Schucker, M.Sc.

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Juni 2020

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2020

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-126867

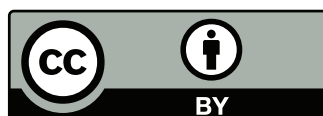
URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/12686>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative-Commons-Lizenz:

Namensnennung 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Opel Automobile GmbH im Bereich EE Advanced Technology unter der Betreuung von Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski, Leiter des Fachgebiets Regelungstechnik und Mechatronik der Technischen Universität Darmstadt.

Ganz besonderes Bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski für die Betreuung dieser Arbeit und die vielen fruchtbaren fachlichen Diskussionen. Seine stets freundliche und wertschätzende Art waren jederzeit eine Bereicherung und Motivationsquelle. Sehr herzlich bedanke ich mich auch bei Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf für die Übernahme des Korreferats.

Darüber hinaus gilt mein Dank all jenen Personen, die mich während meiner Zeit als Doktorand unterstützt haben. Hier möchte ich zunächst meinen beiden Kollegen David Augustin und Dr. Maximilian Harr danken. Es war stets eine Freude mit euch zu arbeiten, sowie bei einer entspannten Runde Skat wieder neue Energie für die Forschungstätigkeiten zu sammeln. Bedanken möchte ich mich auch bei meinem fachlichen Betreuer bei Opel, Dr. Stefan Berger, für die Unterstützung und das Korrekturlesen meiner Arbeit. Michael Dahlke danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit beim Aufbau und der Inbetriebnahme des Versuchsträgers. Darüber hinaus bedanke ich mich bei den Kollegen vom Opel Testzentrum in Dudenhofen für die stets sehr gute und unkomplizierte Zusammenarbeit und Unterstützung.

Außerdem bedanke ich mich bei meinen Mitstreitern des Fachgebiets Regelungstechnik und Mechatronik, für die sehr gute Arbeitsatmosphäre am Institut, die schönen Wanderungen im Kleinalbertal, sowie die fachlichen Diskussionen. Des Weiteren bedanke ich mich für die Unterstützung durch die Mitarbeiter/innen des Sekretariats und der Elektrowerkstatt.

Meinen Freunden aus der Heimat danke ich besonders für die schönen gemeinsamen Reisen an die entlegensten Orte dieser Welt. Diese waren stets eine willkommene Ablenkung. Abschließend gehört mein größter Dank meinen Eltern, die mir das Studium ermöglicht haben und mir stets mit Ihrer Unterstützung zur Seite stehen.

Meersburg, Juli 2020

Jeremias Schucker

Inhaltsverzeichnis

Symbole und Abkürzungen	VIII
Abstract	XI
Kurzfassung	XII
1 Einführung	1
1.1 Projektbeschreibung	2
1.2 Stand der Technik	5
1.2.1 Bestehende Konzepte zur Trajektorienplanung	5
1.2.2 Bestehende Konzepte zur Fahrzeugführung	6
1.3 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit	7
1.4 Gliederung der Arbeit	9
2 Übersicht Gesamtkonzept und Fahrzeugmodellierung	11
2.1 Übersicht Gesamtkonzept	11
2.2 Koordinatensysteme	13
2.3 Übersicht über existierende Fahrzeugmodelle	13
2.3.1 Punktmassenmodell	14
2.3.2 Einspurmodell	14
2.3.3 Kinetisches Zweispurmodell	17
2.4 Auswahl der Modelle	17
2.4.1 Grundlegendes Fahrzeugmodell für die Trajektorienplanung	18
2.4.2 Grundlegendes Fahrzeugmodell für die Fahrzeugführung	18
2.5 Reifenmodell	19
2.6 Fahrstreifenrelative Dynamik	20
2.7 Modellierung der Aktoren	21
2.7.1 Motordynamik	21
2.7.2 Bremsdynamik	23
2.7.3 Vereinheitlichung der Dynamik der Aktoren in Längsrichtung	23
2.7.4 Lenkdynamik	24
2.8 Vollständiges Fahrzeugmodell	24
2.8.1 Vollständiges Fahrzeugmodell für die Trajektorienplanung	25
2.8.2 Vollständiges Fahrzeugmodell für die Fahrzeugführung	25
2.9 Modellplausibilisierung	26
2.9.1 Plausibilisierung des vollständigen Fahrzeugmodells	26
3 Kombinierte Längs- und Quertrajektorienplanung	28

3.1	Allgemeine Einführung in die Trajektorienplanung	28
3.2	Ableitung der Anforderungen an die Trajektorienplanung	30
3.3	Detaillierte Beschreibung ausgewählter Ansätze	31
3.3.1	Ein-Segment-Rasterplanung	31
3.3.2	Nichtlineare Drei-Segment-Planung	33
3.3.3	Analyse der ausgewählten Ansätze	34
3.4	Drei-Segment-Rasterplanung	34
3.4.1	Struktur des Trajektorienplaners	35
3.4.2	Beschreibung des Umfelds	37
3.4.3	Lösungsverfahren der Rasterplanung – Allgemeiner Fall	37
3.4.4	Berechnung der Längstrajektorie	39
3.4.5	Berechnung der Quertrajektorie	43
3.4.6	Kollisionsvermeidung	44
3.4.7	Auswahl der besten Trajektorie	45
3.4.8	Erweiterung auf drei Segmente	46
3.5	Anwendung des Konzepts für Autobahnfahrten	48
3.6	Modelle zur Prädiktion von Fahrzeugbewegungen	51
3.6.1	Rein physikalische Modelle	52
3.6.2	Reaktionsmodelle	53
3.6.3	Auswahl der Prädiktionsmodelle	56
3.7	Konzept zum Fahrstreifenwechselabbruch	57
3.8	Simulationsergebnisse	59
4	Fahrzeugführung	63
4.1	Übersicht, Anforderungen und Grundlagen	63
4.1.1	Einbettung der Fahrzeugführung	63
4.1.2	Ableitung der Anforderungen an die Fahrzeugführung	64
4.1.3	Auswahl der Konzepte zur Fahrzeugführung	65
4.1.4	Struktur mit zwei Freiheitsgraden	66
4.2	Nichtlineare Koordinatentransformation	67
4.3	Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung	72
4.3.1	Schritt 1: Entwurf der Kompensation	72
4.3.2	Schritt 2: Entwurf der Struktur mit zwei Freiheitsgraden	74
4.4	Nichtlineare Vorsteuerung mit linearer zeitvarianter Regelung	77
4.4.1	Entwurf der nichtlinearen Vorsteuerung	77
4.4.2	Zeitvarianter Riccati-Entwurf	79
4.5	Vergleich der Konzepte	84
4.5.1	Konzeptioneller Vergleich	84
4.5.2	Vergleich auf Basis von Simulationsergebnissen	85
5	Prototypische Umsetzung des entwickelten Gesamtkonzepts	88
5.1	Versuchsfahrzeug	88
5.2	Experimentelle Validierung des Gesamtkonzepts	89

5.2.1	Szenario 1: Fehlgeschlagene Auffahrt	89
5.2.2	Szenario 2: Folgefahrt	90
5.2.3	Szenario 3: Überholmanöver	93
5.3	Zusammenfassung der prototypischen Umsetzung	94
6	Zusammenfassung und Ausblick	96
Anhang		99
A.1	Gleichungen des vollständigen Fahrzeugmodells zur Fahrzeugführung	99
A.2	Herleitung der Lösung für das unbeschränkte Optimalsteuerungsproblem	100
A.3	Weitere Ergebnisse der Prototypischen Umsetzung	101
A.3.1	Szenario 4: Schrittweise Absenkung der Geschwindigkeit	101
A.3.2	Szenario 5: Schrittweise Erhöhung der Geschwindigkeit	102
	Literaturverzeichnis	104
	Eigene Veröffentlichungen	110

Symbole und Abkürzungen

Allgemein

Skalare	kursiv, z. B. <i>a, b, c</i>
Vektoren	fett, z. B. a, b, c
Matrizen	fett und Großbuchstaben, z. B. A, B, C

Indizes

$(\cdot)'$	transponierte Größe
$\hat{(\cdot)}$	Größen der entkoppelten linearen Systeme
$(\cdot)^*$	Sollgrößen, die direkt aus der geplanten Trajektorie hervorgehen
$(\cdot)_a$	Größe bezüglich des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug
$(\cdot)_d$	Größe bezüglich der Querablage
$(\cdot)_e$	Größe am Ende des Planungshorizonts
$(\cdot)_f$	Größe am Vorderrad
$(\cdot)_h$	Größe am Hinterrad
$(\cdot)_{\max}$	obere Beschränkung einer Größe
$(\cdot)_{\min}$	untere Beschränkung einer Größe
$(\cdot)_s$	Stellgröße
$(\cdot)_v$	Größe bezüglich der Geschwindigkeit
$(\cdot)_{\text{Ziel}}$	Zielgröße
$\Delta(\cdot)$	Abweichung vom Sollwert

Griechische Symbole

α	Schräglaufwinkel
β	Schwimmwinkel
Γ, γ	Parameter der Folgeregler
δ	Lenkwinkel an den Vorderrädern
η	Zustandsvektor der internen Dynamik
κ	Straßenkrümmung
μ	Radkraftverteilung zwischen Vorder- und Hinterrad
$\xi(\cdot), \xi$	Zustand und Zustandsvektor der externen Dynamik
Φ	Transformationsvorschrift
$\chi, \mathbf{\chi}$	Zustand und Zustandsvektor eines allgemeinen Punktmassenmodells
$\psi, \dot{\psi}$	Gierwinkel und Gierrate

ψ_t fahrstreifenrelativer Gierwinkel

Lateinische Symbole

a_v	Beschleunigung in Richtung der Fahrzeuggeschwindigkeit
a_y	Querbeschleunigung
A, B, C	Systemmatrizen des linearen zeitvarianten Systems
c_α	Schräglaufsteifigkeit
d	Querablage
D	Kompensationsvektor
E	Entkopplungsmatrix
f, g, h	Systemvektoren des Modells zur Fahrzeugführung
$\tilde{\mathbf{f}}$	Systemvektor des Punktmassenmodells
F_x	Längskraft
F_y	Querkraft
$k(\cdot)$	Gewichtungsfaktor
I_z	Trägheitsmoment um die Fahrzeughochachse
$J(\cdot)$	Kostenfunktion
l_a	Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug
l_f, l_h	Abstand des Schwerpunkts zur Vorder- bzw. Hinterachse
l_{frei}	frei befahrbarer Bereich einer Lücke
m	Fahrzeugmasse
P	Lösung der zeitvarianten Riccati-Gleichung
r_1, r_2	relativer Grad des Ausgangs y_1 bzw. y_2
t	Zeit
t_e	Optimierungshorizont der geplanten Trajektorien
t_{Zykl}	Zykluszeit des Trajektorienplaners
$T_{a,\text{Soll}}$	empfohlener zeitlicher Sicherheitsabstand
$T_{a,\text{min}}$	minimaler zeitlicher Sicherheitsabstand
T_p	Prädiktionshorizont der zeitvarianten Regelung
u, \mathbf{u}	Stellgröße bzw. Systemeingang
u_F, u^*	Stellgröße der Folgeregelung bzw. der Vorsteuerung
v	Fahrzeuggeschwindigkeit
x	allgemeine Bezeichnung für einen Systemzustand
$\mathbf{y} = [y_1, y_2]$	Ausgänge des Modells für die Fahrzeugführung
\mathbf{y}_t^*	geplante Trajektorie
z	Zustandsvektor des transformierten Modells zur Fahrzeugführung

Abkürzungen

aB	Prädiktionsmodell mit der Annahme abklingender Beschleunigung
AP	Arbeitspaket
EEAL	Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung
FS	vorausfahrendes Fahrzeug (Frontfahrzeug) auf dem Startfahrstreifen
FZ	vorausfahrendes Fahrzeug (Frontfahrzeug) auf dem Zielfahrstreifen
HS	rückwärtiges Fahrzeug (Heckfahrzeug) auf dem Startfahrstreifen
HZ	rückwärtiges Fahrzeug (Heckfahrzeug) auf dem Zielfahrstreifen
iIDM	improved Intelligent Driver Model [Tian u. a., 2016]
kB	Prädiktionsmodell mit der Annahme konstanter Beschleunigung
kG	Prädiktionsmodell mit der Annahme konstanter Geschwindigkeit
kkB	Prädiktionsmodell mit der Annahme kurzzeitig konstanter Beschleunigung
Ko-HAF	Kooperatives hochautomatisiertes Fahren
MPC	Modellprädiktive Regelung (Model Predictive Control)
NVZR	Nichtlineare Vorsteuerung mit zeitvarianter Regelung
PT1-Glied	Verzögerungsglied erster Ordnung
VaMoRs	Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen

Abstract

The next major step in automated driving is the complete replacement of the human driver with an assistance system. The systems to be developed must therefore be able to plan their future actions and implement them in a targeted manner. For this purpose, it is advisable to divide the system into two components: trajectory planning and vehicle guidance. The task of trajectory planning is to plan a safe path in relation to time, the trajectory. The vehicle guidance in turn takes over both the longitudinal and lateral guidance of the vehicle and ensures that the trajectory is followed safely. In this thesis solution concepts for both components are developed and prototypically implemented in a test vehicle. The considerations are limited to the use case of a motorway drive including entering and exiting the motorway.

In order to enable anticipatory planning, the planned trajectory consists of up to three segments. These can be used, e. g. during a lane change, to approach the gap in the first segment, to carry out the actual lane change in the second segment and to plan the continuation of the journey in the last segment. Within a segment, the trajectory consists of one polynomial each in the longitudinal and lateral direction. The trajectory is the solution to an optimization problem. To determine the optimum, the solution space is discretized, resulting in a discrete set of solution trajectories. From this set, the best solution trajectory is selected using a cost function. The concept of trajectory planning is complemented by a concept for a lane change abort. This concept decides in critical situations whether it is safer to abort or continue a lane change.

Two concepts were examined in the context of vehicle guidance. The first concept, Exact Linearization via Feedback, is based on a nonlinear feedback that compensates for the nonlinearities of the system and decouples the outputs from each other. This makes it possible to design a linear guidance controller for each output. For the second concept, the system is first linearized along the trajectory, resulting in a time-variant linear model. For this, a time-variant Riccati controller is designed and supplemented by an inversion-based feedforward control.

Kurzfassung

Der nächste große Schritt des automatisierten Fahrens ist die vollständige Ersetzung des menschlichen Fahrers durch ein Assistenzsystem. Die zu entwickelnden Systeme müssen demzufolge u. a. in der Lage sein, ihre zukünftige Handlung zu planen und diese zielgerichtet umzusetzen. Hierfür bietet es sich an, das System in zwei Komponenten zu unterteilen: die Trajektorienplanung und die Fahrzeugführung. Die Aufgabe der Trajektorienplanung ist es, einen sicheren Pfad in Abhängigkeit der Zeit, die Trajektorie, zu planen. Die Fahrzeugführung wiederum übernimmt sowohl die Längs- als auch die Querverführung des Fahrzeugs und gewährleistet ein sicheres Folgen der Trajektorie. In dieser Arbeit werden für beide Komponenten Lösungskonzepte entwickelt und prototypisch in einem Versuchsfahrzeug umgesetzt. Die Betrachtungen beschränken sich dabei auf den Anwendungsfall einer Autobahnfahrt inklusive Auf- und Abfahrmanöver.

Um eine vorausschauende Planung zu ermöglichen, besteht die geplante Trajektorie aus bis zu drei Segmenten. Diese können z. B. bei einem Fahrstreifenwechsel dazu genutzt werden, um im ersten Segment die Lücke gezielt anzufahren, im zweiten Segment den eigentlichen Fahrstreifenwechsel durchzuführen und im letzten Segment die Weiterfahrt zu planen. Innerhalb eines Segments besteht die Trajektorie aus je einem Polynom in Längs- und einem Polynom in Querrichtung. Die Trajektorie ergibt sich als Lösung eines Optimierungsproblems. Um das Optimum zu bestimmen, wird der Lösungsraum diskretisiert, wodurch sich eine diskrete Menge an Lösungstrajektorien ergibt. Aus dieser Menge wird die beste Lösungstrajektorie anhand einer Kostenfunktion ausgewählt. Ergänzt wird das Konzept der Trajektorienplanung durch ein Konzept zum Fahrstreifenwechselabbruch. Dieses entscheidet in kritischen Situationen, ob es sicherer ist, einen Fahrstreifenwechsel abubrechen oder fortzuführen.

Im Rahmen der Fahrzeugführung wurden zwei Konzepte untersucht. Das erste Konzept, die Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung, basiert auf einer nichtlinearen Rückführung, die die Nichtlinearitäten des Systems kompensiert und die Ausgänge voneinander entkoppelt. Dadurch ist es möglich, für jeden Ausgang einen linearen Folgeregler zu entwerfen. Für das zweite Konzept wird das System zunächst entlang der Trajektorie linearisiert, wodurch sich ein zeitvariantes lineares Modell ergibt. Für dieses wird ein zeitvarianter Riccati-Regler entworfen und durch eine inversionsbasierte Vorsteuerung ergänzt.

1 Einführung

Bereits im Jahr 1956 zeigte eine Zukunftsvision von General Motors, dass eine automatisierte Fahrt in den Urlaub so gemütlich wie nie zuvor sein kann. Damals noch eine Vision ist das automatisierte Fahren heute neben der Elektromobilität das zentrale Thema in der Automobilindustrie. Die wesentlichen Treiber dieser Entwicklung sind einerseits die neuen Möglichkeiten, die sich für den Fahrer ergeben, sowie andererseits die Erhöhung der Verkehrssicherheit und somit eine Reduktion der Unfallzahlen. Die Entwicklung der aktiven Fahrerassistenzsysteme begann vor ca. 50 Jahren mit der Einführung von Systemen zur Stabilisierung des Fahrzeugs in kritischen Situationen. Zunächst wurde das Antiblockiersystem und kurz darauf die Antischlupfregelung eingeführt und später vor ca. 25 Jahren um das elektronische Stabilitätsprogramm ergänzt.

Zur Jahrtausendwende wurden mit dem Spurhalteassistenten und dem Abstandsregeltempomaten Assistenzsysteme eingeführt, deren primäre Aufgabe es nicht ist, die Verkehrssicherheit zu erhöhen, sondern den Fahrkomfort. Ihre Hauptaufgabe besteht darin, den Fahrer zu entlasten und dadurch idealerweise kritische Situationen zu vermeiden. Es wird angenommen, dass sich die Anzahl der kritischen Szenarien auf Autobahnen um bis zu 82 % reduziert, wenn der Anteil an Pkws mit aktivem Abstandsregeltempomaten bei 51 % liegt [VDA, 2015]. Das Potential der Reduktion von tödlichen Verkehrsunfällen durch aktive Assistenzsysteme lässt sich auch in Bild 1.1 erkennen. Hier sieht man, dass die Anzahl der Verkehrstoten kontinuierlich abnimmt, während die Anzahl der Assistenzsysteme im Fahrzeug kontinuierlich zunimmt. Fairerweise muss dazu gesagt werden, dass der Rückgang der Unfallzahlen nicht ausschließlich auf die Verwendung von Assistenzsystemen zurückzuführen ist, sondern z.B. auch auf infrastrukturelle Änderungen wie Geschwindigkeitsbegrenzungen.

Die bisher genannten Assistenzsysteme erfordern immer, dass der Fahrer entweder die vollständige Kontrolle über das Fahrzeug inne hat (SAE Level 0), Längs- oder Querbewegung durchführt (SAE Level 1) oder nur noch das Verkehrsgeschehen beobachtet (SAE Level 2) [SAE 2018]. Laut Statistischem Bundesamt sind allerdings 88 % aller Unfälle auf menschliches Versagen zurückzuführen, wohingegen technische Mängel lediglich 1 % ausmachen [Statistisches Bundesamt, 2018]. Somit ist es konsequenterweise das aktuelle Ziel, die Fahrerassistenzsysteme dahingehend zu entwickeln, dass der menschliche Fahrer nur noch als Rückfallebene dient (SAE Level 3) oder im Idealfall gar nicht mehr eingreifen muss und das Fahrzeug somit hochautomatisiert fährt (SAE Level 4). Das hochautomatisierte Fahren unterscheidet sich vom autonomen bzw. fahrerlosen Fahren (SAE Level 5) dadurch, dass es nur einen bestimmten Anwendungsfall abdecken kann z. B. die Autobahnfahrt. Als erster Anwendungsfall für die Entwicklung des hochautomatisierten Fahrens erweist sich die Autobahnfahrt aufgrund ihrer klar definierten Systemgrenzen als sinnvoll.

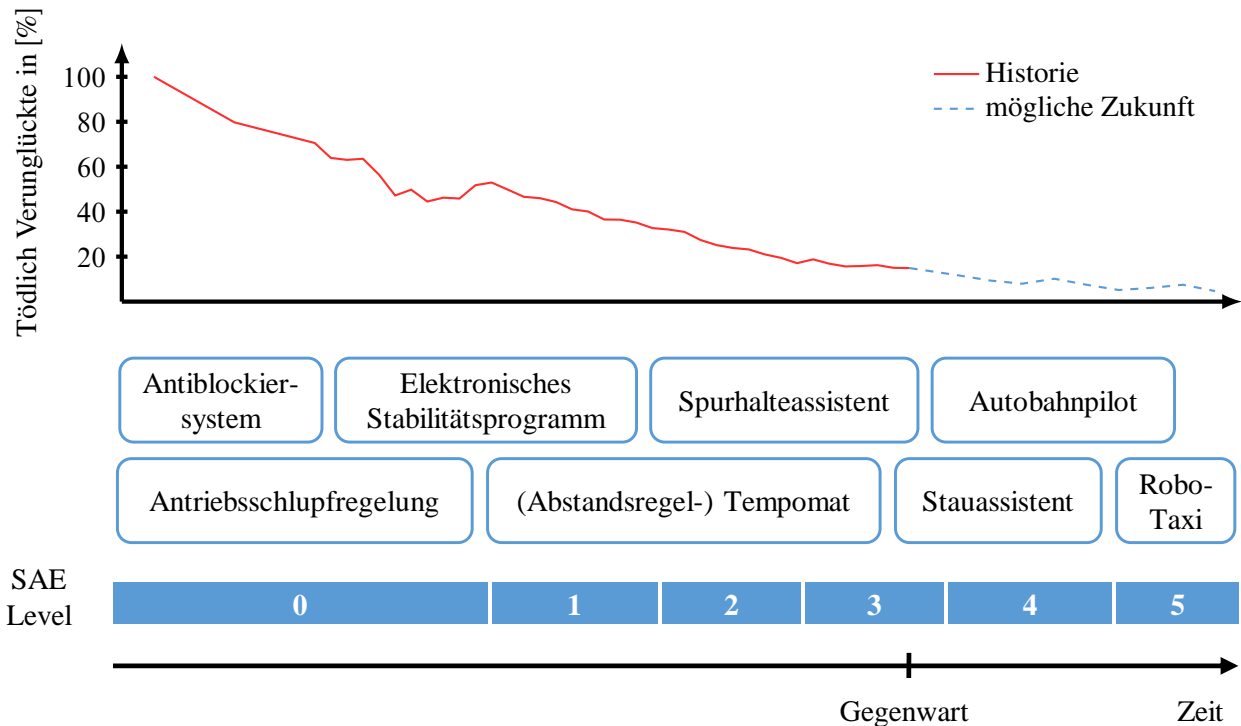


Bild 1.1: Die zeitliche Entwicklung der tödlich Verunglückten bei Verkehrsunfällen bezogen auf das Jahr 1970 [Statistisches Bundesamt, 2019] (oben), die Entwicklung von aktiven Fahrerassistenzsystemen (Mitte) und die Einstufung der Assistenzsysteme in die zugehörigen SAE Level (unten)

1.1 Projektbeschreibung

Das Projekt Ko-HAF¹ (Kooperatives hochautomatisiertes Fahren) beschäftigt sich genau mit dem dargelegten Handlungsbedarf der Entwicklung eines Systems zum automatisierten Fahren auf der Autobahn. Dabei betrachtet das Projekt eine Kombination aus SAE Level 3 und SAE Level 4. Das heißt, es gibt einerseits einen Fahrer als Rückfallebene, falls das System an seine Grenzen kommt und zum anderen wird auch ein Notbetrieb entwickelt. Der Notbetrieb überführt das Fahrzeug in einen sicheren Zustand, falls der Fahrer bei Erreichen der Systemgrenze nicht das Steuer übernimmt. Ein aktuelles grundlegendes Problem ist es, dass die heutige Reichweite von Sensoren, wie z. B. Kamera oder Radar, für automatisiertes Fahren auf der Autobahn nicht ausreichend ist. Um diesen Engpass zu überwinden, wird die Vorausschau für die Umfeldsensoren durch einen virtuellen Sensor ergänzt, den sog. Safety Server. Der Safety Server ist eine Backend-Lösung. Die Idee hierbei ist, dass jedes Fahrzeug relevante dynamische Ereignisse an den Safety Server sendet. Relevante dynamische Ereignisse können hierbei z. B. ein Stau, ein Liegenbleiber oder ein geänderter Fahrstreifenverlauf sein. Die gesammelten Ereignisse werden auf dem Backend bewertet, aggregiert und in eine digitale Karte eingepflegt. Diese Aggregation der Ereignisse ist somit ei-

¹ gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages

ne Art kollektive Wahrnehmung. Jedes Fahrzeug wiederum kann diese Information als eine Art virtuellen Sensor nutzen, um die fehlende Sensorreichweite zu kompensieren.

Hierfür wurde das Projekt in fünf Arbeitspakete (APs) aufgeteilt. In AP 1, Umfelderkennung und -repräsentation, wird der Safety Server entworfen sowie die Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Safety Server bereitgestellt. Damit die dynamischen Ereignisse hoch genau in die digitale Karte eingetragen werden können, wird eine genaue Lokalisierung des Fahrzeugs benötigt. Diese wird innerhalb von AP 2, Lokalisierung und statisches Umfeldmodell, entwickelt. Da der Fahrer als mögliche Rückfallebene dient, muss bewertet werden, wie viel Zeit der Fahrer benötigt, um die vollständige Kontrolle über das Fahrzeug zu erlangen. Diese Untersuchung wird in AP 3, Kontrollierbare Automation, durchgeführt. Die eigentliche Assistenzfunktion, das heißt die Wahrnehmung des Umfelds sowie die Planung und Durchführung der aktiven Eingriffe, um das Fahrzeug automatisiert auf der Straße zu führen, sind Aufgabe von AP 4, Funktionsentwicklung für Normal- und Notbetrieb. Für die Validierung von hochautomatisierten Assistenzfunktionen können aufgrund der Komplexität der möglichen Szenarien klassische Methoden nicht angewendet werden. Deshalb beschäftigt sich AP 5, Absicherung und Erprobung, mit der Untersuchung neuer Möglichkeiten, diese Systeme zu validieren. Eine Übersicht des Ko-HAF-Gesamtsystems ist in Bild 1.2 zu sehen.

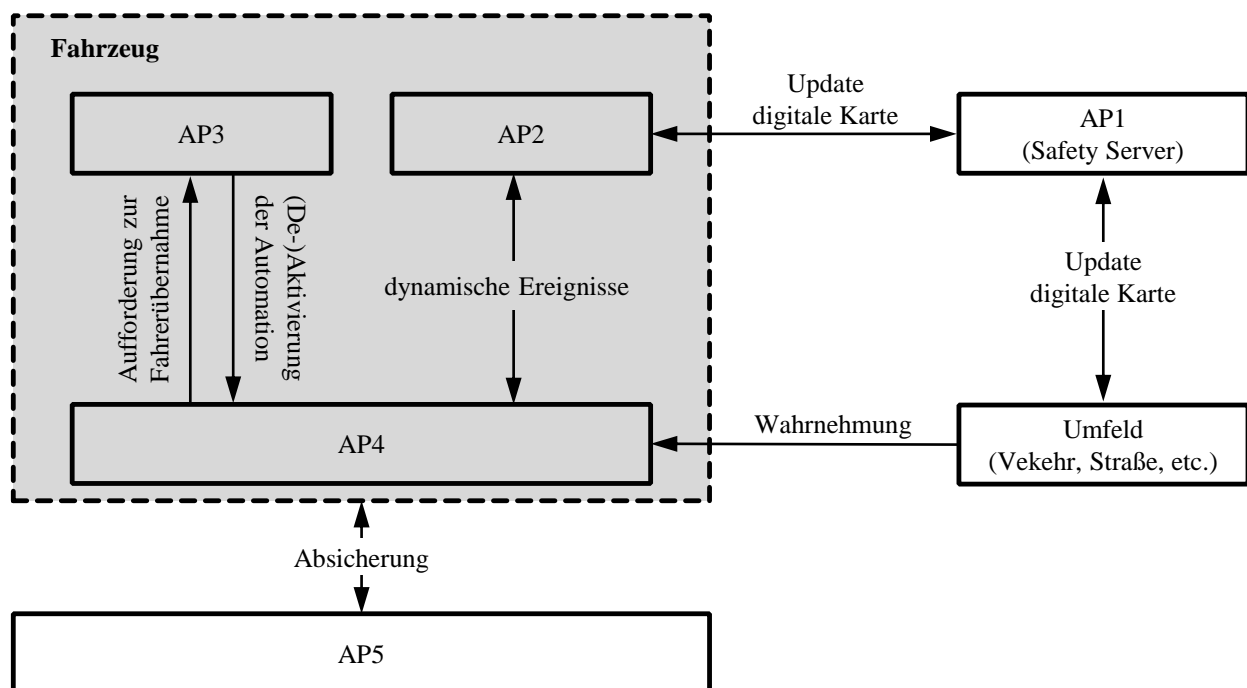


Bild 1.2: Übersicht über die Arbeitspakete des Projekts Ko-HAF. Die Komponenten der grau hinterlegten APs befinden sich hierbei im Fahrzeug und die der weiß hinterlegten APs außerhalb.

Die vorliegende Arbeit ist zentraler Bestandteil von AP 4 und wird zwei wesentliche Aspekte dieses Arbeitspakets untersuchen: Die Trajektorienplanung und die Fahrzeugführung. Aus diesem Grund wird AP 4 im folgenden noch detaillierter betrachtet. Wie in Bild 1.3 dargestellt, kann man die Aufgabe der Funktionsentwicklung in drei Handlungsebenen unterteilen: Wahrnehmung,

Planung und Ausführung. Die Wahrnehmungsebene erfasst hierbei alle Informationen des Fahrzeugumfelds und bereitet sie entsprechend den Anforderungen der nachgelagerten Ebenen auf. Diese Informationen enthalten u. a. sämtliche Details über andere Verkehrsteilnehmer, Hindernisse, Fahrstreifenmarkierungen, etc. und werden in der Planungsebene in einem ersten Schritt für die Fahrstrategie verarbeitet. Die Aufgabe der Fahrstrategie ist es, unter Berücksichtigung der aktuell wahrgenommen Situation und dem von der Wahrnehmungsebene prädizierten zukünftigen Verhalten des Umfelds, ein passendes Manöver auszuwählen. Anhand der Umfelddaten und unter Berücksichtigung des Manöverwunsches plant der Trajektorienplaner einen Pfad in Abhängigkeit der Zeit, die Trajektorie. In der Ausführungsebene erzeugt die Fahrzeugführung die passenden Steuersignale, um das Fahrzeug entlang der geplanten Trajektorie zu führen.

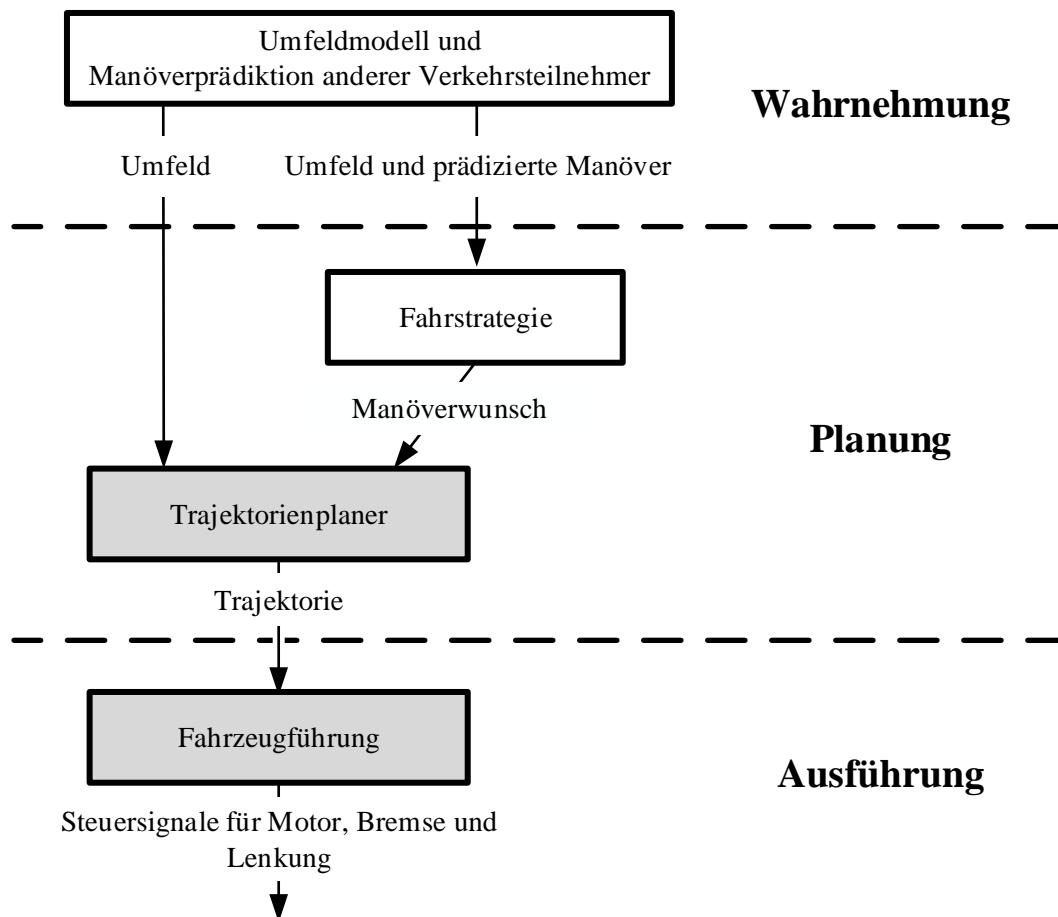


Bild 1.3: Übersicht der zentralen Funktionen von AP4 und deren Zuordnung zu den drei Handlungsebenen. Die beiden in dieser Arbeit untersuchten Komponenten sind grau hinterlegt.

1.2 Stand der Technik

Die Thematik der Trajektorienplanung und Fahrzeugführung ist aktueller Forschungsinhalt zahlreicher Arbeiten. Dabei werden sehr verschiedene Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens betrachtet z. B. Ausweichmanöver, automatisiertes Fahren auf Rennstrecken oder, wie bereits beschrieben, auf der Autobahn. Der Stand der Technik beschränkt sich deshalb speziell auf aktuelle Arbeiten mit Bezug zum in dieser Arbeit betrachteten automatisierten Fahren auf der Autobahn.

1.2.1 Bestehende Konzepte zur Trajektorienplanung

Bereits 1995 fuhr das im EUREKA² Projekt Prometheus III entwickelte Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen (VaMoRs) automatisiert auf der Autobahn mit bis zu 180 km/h [Dickmanns, 1995]. Ebenso wie viele aktuelle Seriensysteme zum Halten des Fahrstreifens oder zum Einstellen einer Wunschgeschwindigkeit verwendete auch VaMoRs keine Trajektorienplanung. Dennoch konnte es bereits rudimentäre automatisierte Fahrstreifenwechsel durchführen. Dazu wurde zunächst überprüft, ob auf dem benachbarten Fahrstreifen ein ausreichender Freiraum bestand. War ein entsprechender Freiraum vorhanden, wurde eine generische vorbezeichnete Lenkbewegung durchgeführt [Dickmanns u. a., 1994]. Nilsson hat diese grundlegende Idee auf die Trajektorienplanung für automatisierte Fahrstreifenwechsel erweitert [Nilsson u. a., 2016]. Zunächst führen sie eine Metrik ein, um einen passenden Freiraum auf dem benachbarten Fahrstreifen auszuwählen. Ist dieser gefunden, wird eine kollisionsfreie Längstrajektorie berechnet und anschließend um eine kollisionsfreie Quertrajektorie ergänzt. Ein entscheidender Nachteil dieses Ansatzes ist, dass die Querbewegung bei der Planung der Längsbewegung nicht berücksichtigt wird. Dadurch wird eine Vielzahl möglicher Fahrstreifenwechsel vorab ausgeschlossen. Dies kann dazu führen, dass kein Fahrstreifenwechselmanöver gefunden wird, obwohl ein Fahrstreifenwechsel prinzipiell möglich ist. Diese Schwäche hat T. Hansen in seinen beiden Konzepten zur kombinierten Längs- und Quertrajektorienplanung gelöst [Hansen, Schulz u. a., 2017, 2016]. Hierbei bestehen sowohl die Längs- als auch die Quertrajektorien aus mehreren Polynomen, deren Parameter über ein nichtlineares Optimierungsproblem bestimmt werden. Sowohl Nilsson als auch Hansen beschränken sich in ihren Betrachtungen allerdings auf den Anwendungsfall des Fahrstreifenwechsels.

Ein allgemeines Konzept zur kombinierten Längs- und Querplanung, das sowohl für Normalfahrt als auch Fahrstreifenwechsel und Einfädelmanöver geeignet ist, wird von Werling, Kammel u. a. [2012] vorgestellt. Hierbei planen sie sowohl in Längs- als auch in Querrichtung ein Polynom fünfter Ordnung. Um die beste Trajektorie zu finden, wird der Zustandsraum in ein Raster aufgeteilt. Anschließend wird jedes Polynom in Längsrichtung mit jedem Polynom in Querrichtung kombiniert und anhand einer Kostenfunktion die beste Trajektorie ausgewählt. Um die Dynamik der Aktoren in der Planung zu berücksichtigen, haben Rathgeber u. a. [2016] dieses Konzept auf Polynome siebter Ordnung erweitert. Ein entscheidender Nachteil bei diesem Ansatz ist allerdings, dass der Fahrstreifenwechsel zum aktuellen Planungszeitpunkt beginnt. Somit ist es nicht

²EUREKA ist eine 1985 gegründete europäische Initiative für marktnahe Forschung und Entwicklung.

möglich, zuerst eine Lücke anzufahren und den Fahrstreifenwechsel erst zu einem späteren Zeitpunkt zu beginnen. Viele weitere Ansätze für allgemeine Trajektorienplanung in der Literatur verwenden eine Modellprädiktive Regelung (MPC) [Gutjahr u. a., 2017; Ziegler, Bender u. a., 2014]. Diese bestimmen die optimale Trajektorie je nach verwendetem Fahrzeugmodell mithilfe eines linearen oder nichtlinearen Optimierungsproblems.

Eine bisher noch nicht intensiver untersuchte Thematik ist das zur Prädiktion anderer Verkehrsteilnehmer zu verwendende Modell. Schildbach u. a. [2015] bemängeln, dass physikalische Modelle anderer Verkehrsteilnehmer die Unsicherheit über mögliche zukünftige Handlungen nicht ausreichend abbilden. Daher seien sie nur für etwa eine Sekunde lang gültig. Als Lösung schlägt er eine szenariobasierte Prädiktion anderer Verkehrsteilnehmer vor. Evestedt u. a. [2016] hingegen verwenden ein Reaktionsmodell. Dieses soll die mangelnde Prädiktionsfähigkeit der physikalischen Modelle durch die Berücksichtigung von Interaktion in Längsrichtung zwischen zwei Fahrzeugen beheben. In einer Simulationsstudie zeigt er, dass mit der Verwendung eines Interaktionsmodells bessere Ergebnisse erzielt werden können als mit einem physikalischen Modell.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die vorgestellten Konzepte sich entweder nur auf einen Teilaspekt der Autobahnfahrt fokussieren, dass sie Einschränkungen bei der Planung des Fahrstreifenwechsels in Kauf nehmen oder die Modelle zur Prädiktion anderer Verkehrsteilnehmer zu ungenau sind. In der Summe enthalten die präsentierten Konzepte jedoch bereits die wesentlichen Aspekte, die für eine Trajektorienplanung auf der Autobahn benötigt werden. Deshalb beschäftigt sich diese Arbeit damit, ein Konzept zur Trajektorienplanung zu erstellen, das alle wesentlichen Aspekte berücksichtigt.

1.2.2 Bestehende Konzepte zur Fahrzeugführung

Die Fahrzeugführung wird immer von einer Regelung durchgeführt. Eine Regelung ist hierbei eine Anordnung, die sich durch eine kontinuierliche Messung der Abweichung der Wunschgröße von ihrem Sollwert und einem daraus berechneten Eingriff in das System auszeichnet [Föllinger u. a., 2016]. Der Stand der Technik wird anhand von verschiedenen Eigenschaften präsentiert, durch die sich bestimmte Gruppen von Regelkonzepten auszeichnen. Ein Konzept kann hierbei verschiedene Eigenschaften besitzen und somit mehreren Gruppen angehören.

Eine Großzahl der Fahrzeugführungskonzepte basiert auf einfachen linearen Fahrzeugmodellen. Speziell für die Querführung wird hierbei häufig eine auf dem PID-Regler basierende Struktur eingesetzt [Isermann, 2006; Kranz u. a., 2016; Schorn, 2007]. Der Grund hierfür ist der verhältnismäßig einfache Entwurf eines Reglers für lineare Modelle. Diese Regler haben allerdings den Nachteil, dass sie abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit sind, d. h. sie sind nur in einem kleinen Geschwindigkeitsbereich gültig. Somit muss eine geschwindigkeitsabhängige Parametrierung durchgeführt werden, um einen großen Geschwindigkeitsbereich abzudecken. Dies erhöht den Implementierungsaufwand erheblich. Vor allem im Hinblick auf einen möglichen Einsatz für Serienfahrzeuge ist dies nicht wünschenswert, da hierbei die Regelung für jedes Fahrzeugmodell kalibriert werden muss. Anstelle der geschwindigkeitsabhängigen Parametrierung kann die Ge-

schwindigkeit auch als zeitvarianter Parameter mit in das lineare Modell aufgenommen werden, was allerdings zu einem deutlich komplexeren Regelungsentwurf führen kann.

Eine weitere Gemeinsamkeit, die viele Konzepte aufweisen, ist eine Vernachlässigung der Kopplung zwischen Längs- und Querdynamik des Fahrzeugs, d. h. Längs- und Querführung des Fahrzeugs werden unabhängig voneinander entworfen [Aeberhard u. a., 2015; Levinson u. a., 2011; Massera Filho u. a., 2014; Ziegler, Dang u. a., 2014]. Dies ist einerseits dadurch zu erklären, dass, wie bereits dargelegt, oftmals lineare Modelle für den Entwurf der Regelungen herangezogen werden. Mit diesen kann die Kopplung zwischen Längs- und Querdynamik nicht abgebildet werden. Andererseits ist diese Vorgehensweise historisch bedingt. Durch die Möglichkeit, Längs- und Querführung in aktuellen Serienfahrzeugen unabhängig voneinander aktivieren zu können, ist ein getrennter Entwurf von Längs- und Querführung sinnvoll. In der neueren Literatur finden sich jedoch vermehrt Ansätze mit einer kombinierten Regelung für Längs- und Querführung [Fuchshumer, 2005; Menhour u. a., 2014; Werling, Gröll u. a., 2010].

Bei den zuletzt genannten Konzepten mit kombinierter Längs- und Querführung ist eine weitere Gemeinsamkeit vorzufinden: Sie verwenden als Wunschgröße, der der Regler folgen soll, eine globale Position [Hahn, 2017; Mayr, 1991; Schorn, 2007; Werling, Gröll u. a., 2010]. Für das Durchführen von Ausweich- oder Parkmanövern kann diese Wahl sinnvoll sein, da diese oftmals in unstrukturierter Umgebung stattfinden. Die ununterbrochene Bereitstellung einer exakten globalen Position für eine längere Autofahrt ist aus heutigem Stand der Technik allerdings in ausreichender Genauigkeit nur schwer möglich.

Ein letzter Aspekt ist die Berücksichtigung der Dynamik der Aktoren (Lenkung, Bremse und Motor). So weist der Motor z. B. eine Totzeit auf, und auch Lenkung und Bremse benötigen eine gewisse Zeit, bis ein gewünschter Lenkradwinkel bzw. eine Beschleunigung erreicht ist. Diese Zeit wird oftmals vernachlässigt [Fuchshumer, 2005; Mayr, 1991; Werling, Gröll u. a., 2010] oder als lineares Verzögerungsglied modelliert [Hahn, 2017; Schorn, 2007].

Abschließend kann festgehalten werden, dass die meisten in der Literatur bestehenden Konzepte nicht mit speziellem Fokus auf eine Umsetzung in einem Serienfahrzeug entwickelt werden. Aus diesem Grund besitzen sie teilweise sehr viele Einstellparameter oder die Bestimmung einer globalen Position. Zusätzlich vernachlässigen viele die Kopplung zwischen Längs- und Querdynamik. Im Gegensatz dazu liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Untersuchung von Konzepten zur kombinierten Längs- und Querregelung unter ausschließlicher Verwendung von Sensorik, die bereits in aktuellen Serienfahrzeugen verbaut ist.

1.3 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

Die aktuell in Serie befindlichen Fahrerassistenzsysteme wurden primär mit dem Fokus entwickelt, in Längsrichtung eine Wunschgeschwindigkeit bzw. einen festen Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug einzustellen und um das Fahrzeug in der Fahrstreifenmitte zu führen. Für hochautomatisiertes Fahren muss das automatisierte Fahrzeug auch in der Lage sein, komplexe

Szenarien, wie z. B. die Autobahnauffahrt, zu beherrschen. Hierfür ist es notwendig, eine kollisionsfreie Trajektorie zu berechnen und dieser exakt zu folgen. Diese Anforderungen können die aktuellen Systeme nicht erfüllen. Deshalb ist es notwendig neue Konzepte, sowohl für die Trajektorienplanung als auch für die Fahrzeugführung, zu untersuchen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem hochautomatisierten Fahren. Hier ist eine getrennte Aktivierbarkeit von Längs- und Querführung nicht notwendig. Entweder übernimmt das automatisierte Fahrzeug die vollständige Fahrzeugführung oder der Fahrer. Ein kooperativer Modus, bei dem sowohl Fahrer als auch automatisierte Fahrfunktion aktiv sind, wird nicht betrachtet. Aufgrund der Tatsache, dass Längs- und Querführung stets gleichzeitig aktiv sind, werden speziell Methoden zur Fahrzeugführung untersucht, die die Kopplung zwischen Längs- und Querdynamik berücksichtigen. Der Übergang der betrachteten Komponenten von der Entwicklung hin zur Serienreife soll sich möglichst kurz gestalten. Daher ist bei der Trajektorienplanung besonders darauf zu achten, dass der Algorithmus recheneffizient und möglichst unabhängig von häufig in Unternehmen existierenden Softwarerestriktionen ist. Für die Fahrzeugführung bedeutet dies, dass die Anzahl der Einstellparameter gering sein soll und der gültige Arbeitsbereich des Reglers möglichst groß. Die Zielsetzung der Arbeit kann in den folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Herleitung eines Regelstreckenmodells mit Gültigkeit im gesamten Geschwindigkeitsbereich unter der Vorgabe, dass alle Zustandsgrößen des Regelstreckenmodells mit aktuell in Serienfahrzeugen verbauter Sensorik messbar sind. Dies sind im Einzelnen: Radgeschwindigkeitssensor, Radar, Kamera und inertielle Messeinheit.
- Entwicklung eines allgemeinen Konzepts zur kombinierten Längs- und Quertrajektorieplanung, d. h.
 - es ist sowohl für Normalfahrt und Fahrstreifenwechsel als auch Autobahnauf- und -abfahrt konzipiert,
 - es wird eine Abhängigkeit von Längs- und Quertrajektorie zueinander in der Planung berücksichtigt.
- Die Konzeption zur Fahrzeugführung soll die Kopplung zwischen Längs- und Querdynamik berücksichtigen.
- Die Entwicklung der Komponenten soll seriennah erfolgen, d. h.
 - die für die Trajektorienplanung benötigte Rechenzeit muss gering sein,
 - die Anzahl der Einstellparameter der Fahrzeugführung soll gering sein.
- Prototypische Implementierung der Trajektorienplanung und Fahrzeugführung in einem Versuchsfahrzeug.

Unter Normalfahrt wird hierbei das Fahren innerhalb eines Fahrstreifens verstanden. Je nach Situation wird dem Vorderfahrzeug gefolgt (Folgefahrt) oder, wenn kein Vorderfahrzeug vorhanden ist, wird frei gefahren (Freifahrt). Der Fokus der Arbeit liegt auf einem Geschwindigkeitsbereich

von 0 – 130 km/h und zudem werden keine Notfallmanöver wie z. B. Ausweichmanöver betrachtet.

1.4 Gliederung der Arbeit

Im nachfolgenden Kapitel wird die Herleitung des Fahrzeugmodells vorgestellt. Zuerst werden die dafür benötigten Koordinatensysteme eingeführt. Anschließend werden die in der Literatur vorhandenen Fahrzeugmodelle betrachtet und kurz diskutiert. Um eine exakte Fahrzeugführung zu gewährleisten, werden die Modelle um ein Reifenmodell und die Aktordynamik erweitert.

In Kapitel 3 wird die kombinierte Längs- und Quertrajektorienplanung vorgestellt. Hierbei werden zunächst die Grundlagen vorgestellt, auf denen der Trajektorienplaner basiert. Anhand dieser Grundlagen wird der Trajektorienplaner entworfen und dargelegt, wie damit die verschiedenen Manöver – Normalfahrt, Fahrstreifenwechsel, etc. – durchgeführt werden können. Danach wird die Kernfunktionalität des Trajektorienplaners durch ein Konzept zum Abbruch eines Fahrstreifenwechselmanövers ergänzt und verschiedene Modelle zur Prädiktion anderer Verkehrsteilnehmer betrachtet.

Die Fahrzeugführung wird in Kapitel 4 erläutert. In diesem Kapitel werden zunächst die Anforderungen an die Fahrzeugführung aufgestellt und daraufhin zwei geeignete Methoden ausgewählt. Mit Hilfe dieser Methoden werden zwei Konzepte zur automatisierten Fahrzeugführung entwickelt und abschließend mithilfe des Simulationswerkzeugs IPG CarMaker³ miteinander verglichen.

In Kapitel 5 „Prototypische Umsetzung des entwickelten Gesamtkonzepts“ wird zunächst der Aufbau des Versuchsfahrzeugs kurz dargestellt. Anschließend wird die Leistungsfähigkeit der entwickelten Konzepte zur Trajektorienplanung und Fahrzeugführung in exemplarischen Szenarien im realen Fahrversuch betrachtet.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse werden in Kapitel 6 zusammengefasst und weiterer Forschungsbedarf dargelegt.

Eine Übersicht der Gliederung und der Beziehungen der einzelnen Kapitel zueinander ist in Bild 1.4 gegeben.

³<https://ipg-automotive.com/de/>

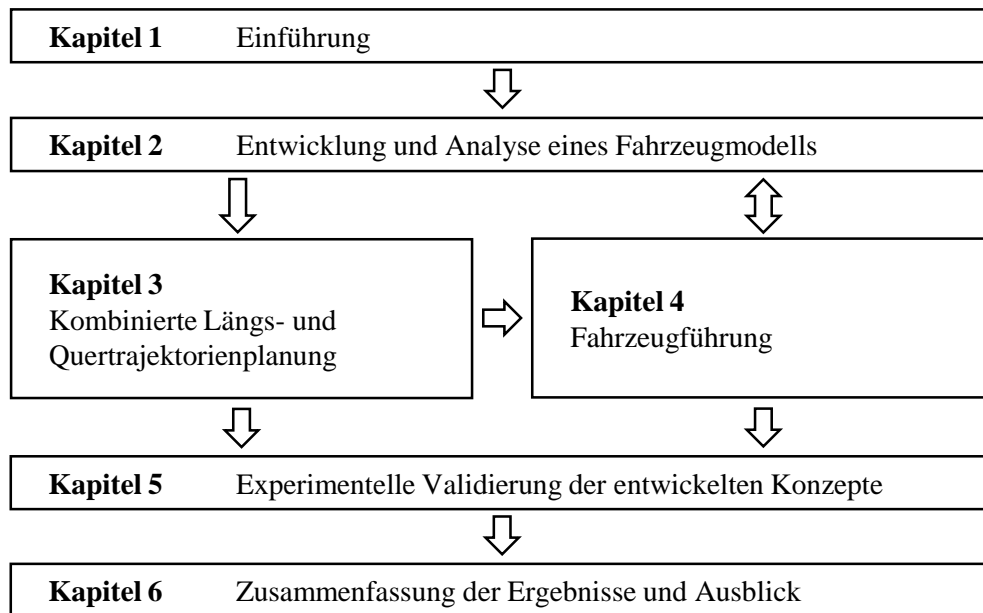


Bild 1.4: Übersicht über die Gliederung der Arbeit

2 Übersicht Gesamtkonzept und Fahrzeugmodellierung

Zunächst wird eine Übersicht des Gesamtkonzepts präsentiert. Anschließend werden die für die Umsetzung des Gesamtkonzepts benötigten Fahrzeugmodelle vorgestellt. Für die Beschreibung der Fahrzeugbewegung entlang einer Straße werden Koordinatensysteme benötigt. Anhand dieser Koordinatensysteme wird im nachfolgenden Abschnitt die Bewegung des Fahrzeugs beschrieben. Die gesamte in dieser Arbeit betrachtete Fahrzeugbewegung erfolgt auf einer Straße, die in vereinfachender Weise als Ebene betrachtet wird. Daher beschränken sich alle Betrachtungen innerhalb dieser Arbeit auf einen zweidimensionalen Raum. Da Trajektorienplanung und Fahrzeugführung grundsätzlich verschiedene Ansprüche an die Modellierung der Fahrzeugbewegung stellen, wird zunächst ein kurzer Literaturüberblick über vorhandene Fahrzeugmodelle gegeben. Anschließend werden den Anforderungen entsprechende Modelle ausgewählt.

2.1 Übersicht Gesamtkonzept

Ziel dieser Arbeit ist es, ein System zu entwickeln, das sowohl die Trajektorienplanung als auch die Fahrzeugführung zuverlässig durchführt. Grundsätzlich sind hierfür zwei Strukturen denkbar. Die erste Möglichkeit ist die einer kombinierten Trajektorienplanung und Fahrzeugführung. Bei dieser werden Trajektorienplanung und Fahrzeugführung in einem Optimalsteuerungsproblem zusammengeführt und man erhält eine MPC-Regelung. Durch die Zusammenfassung der beiden Komponenten verringert sich die Anzahl der Parameter deutlich. Demgegenüber stehen jedoch einige Nachteile. Durch die Reduktion der beiden Komponenten zu einer einzigen muss diese nun sowohl die Anforderungen der Trajektorienplanung als auch der Fahrzeugführung erfüllen. Die Fahrzeugführung benötigt ein genaues Fahrzeugmodell. Dies führt dazu, dass die Berechnung der Trajektorien sehr rechenintensiv wird. Gleichzeitig benötigt die Fahrzeugführung sehr kurze Zykluszeiten. Dies steht im Widerspruch zur Rechenintensität, wodurch eine echtzeitfähige Umsetzung des Algorithmus deutlich erschwert wird. Zusätzlich ist eine MPC-Regelung in ihrer grundlegenden Form nicht in der Lage, konstante Störungen zu kompensieren. Dadurch kommt es zu sogenannten Hundekurven [Werling, 2011]. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine kaskadenartige Struktur ähnlich der einer Kaskadenregelung verwendet, siehe Bild 2.1. Der Vorteil einer kaskadenartigen Struktur ist, dass es einen schnellen inneren Kreis und einen langsameren äußeren Kreis gibt. Dadurch kann der innere Kreis Störungen im Idealfall kompensieren, ohne dass der äußere Kreis zusätzlich eingreifen muss. Der innere Kreis übernimmt die Aufgabe der Fahrzeugführung. Er stellt sicher, dass die durch die Trajektorie vorgegebene Querablage und Geschwindigkeit eingestellt werden. Im äußeren Kreis wird die benötigte Trajektorie berechnet. Diese sorgt dafür, dass das von der Fahrstrategie gewünschte Manöver unter Einhaltung der Sicherheitsabstände zu

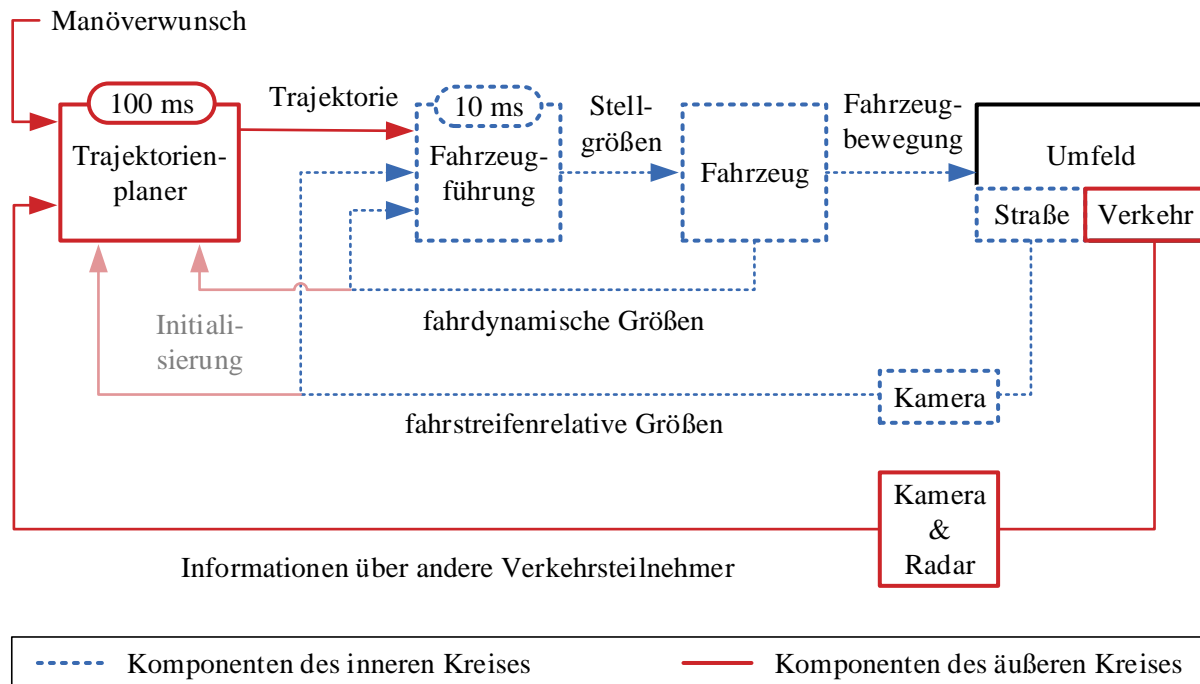


Bild 2.1: Übersicht über die in dieser Arbeit verwendete kaskadenartige Struktur zur Trajektorienplanung und Fahrzeugführung

anderen Verkehrsteilnehmern durchgeführt wird. Für die Trajektorienplanung sind hierbei weitere Dinge zu beachten: Bei Aktivierung des Systems wird die Trajektorienplanung einmalig mit der aktuellen Querablage und Geschwindigkeit initialisiert. Für die darauffolgenden Planungszyklen wird der Startwert aus der zuletzt berechneten Trajektorie entnommen. Der Grund hierfür ist in Bild 2.2 dargestellt: Verwendet die Trajektorienplanung als Startwert die aktuellen Messwerte, wird die Abweichung zur Trajektorie zu Beginn jedes Planungszyklus ruckartig zu Null gesetzt. Die Aufgabe des inneren Kreises ist es, diese Abweichung abzubauen. Durch ein Nullsetzen der

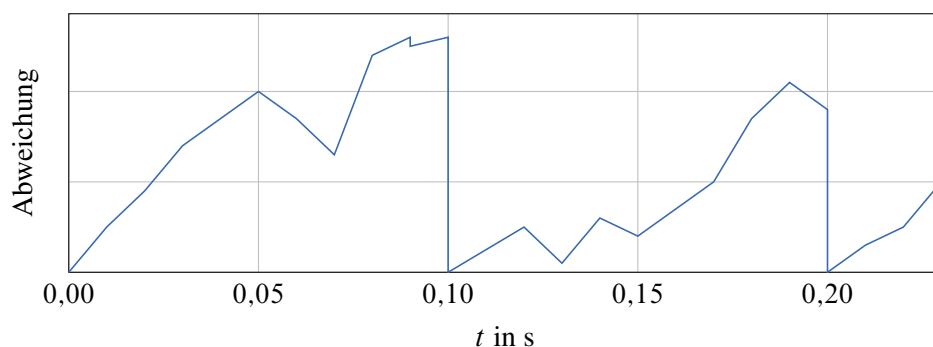


Bild 2.2: Beispielhafter Verlauf der Abweichung von der geplanten Trajektorie bei Verwendung der aktuellen Messwerte als Startwerte für die Trajektorienplanung

Abweichung muss die Fahrzeugführung kurzzeitig nicht eingreifen und dadurch springt auch die Stellgröße auf Null. Somit entsteht eine für die Fahrzeuginsassen sehr unangenehme Fahrweise. Außerdem wird zu Beginn eines Fahrstreifenwechsels einmalig aus dem Initialisierungspfad die aktuelle Fahrstreifenbreite sowohl der Start- als auch der Zielfahrstreifen entnommen.

2.2 Koordinatensysteme

Die in dieser Arbeit verwendeten Koordinatensysteme basieren auf den aktuell im Automobilbereich verwendeten Normen [DIN ISO 8855] und sind in Bild 2.3 dargestellt.

- **Globales Koordinatensystem**

Das globale Koordinatensystem ist ein erdfestes Inertialsystem mit beliebigem Ursprung auf der Erdoberfläche. Es ist so zu wählen, dass die Z -Achse parallel zum Gravitationsvektor liegt.

- **Fahrzeugkoordinatensystem**

Das Fahrzeugkoordinatensystem hat seinen Ursprung in der orthogonalen Projektion des Fahrzeugschwerpunkts auf die Straßenoberfläche. Die X -Achse verläuft dabei in Richtung der Längsachse und die Y -Achse orthogonal zur Fahrzeuglängsachse. Die Z -Achse ist orthogonal zur Straßenoberfläche.

- **Straßenkoordinatensystem**

Die globale Position eines Fahrzeugs ist für die Beschreibung der Bewegung auf der Straße ungeeignet. Die entscheidende Größe zur Führung eines Fahrzeugs innerhalb eines Fahrstreifens ist der relative Abstand zur Fahrstreifenmitte. Aus diesem Grund wird ein Straßenkoordinatensystem eingeführt. Dieses hat seinen Ursprung in der Mitte des Fahrstreifens auf der Straßenoberfläche. Die X -Achse liegt parallel zur Tangente an den Fahrstreifenverlauf und die Z -Achse orthogonal zur Straßenoberfläche. Die X -Koordinate beschreibt somit die zurückgelegte Strecke entlang des Fahrstreifens und die Y -Koordinate den lateralen Abstand zur Fahrstreifenmitte. In der Literatur wird dieses Koordinatensystem auch als Frénet- oder Frénet-Serret-Koordinatensystem bezeichnet.

Die Zugehörigkeit der in dieser Arbeit verwendeten Größen zum passenden Koordinatensystem wird nur dann durch ein Subskript verdeutlicht, wenn eine eindeutige Zuordnung nicht aus dem Zusammenhang möglich ist.

2.3 Übersicht über existierende Fahrzeugmodelle

Der folgende Überblick stellt die wesentlichen, in der Literatur verwendeten Fahrzeugmodelle kurz vor. Zuerst wird das einfachste Modell vorgestellt, und anschließend nimmt die Komplexität von Modell zu Modell zu. Um die Übersichtlichkeit der Modellgleichungen zu erhöhen, wird sowohl in diesem Kapitel als auch im Rest der Arbeit auf eine explizite Angabe der Abhängigkeit der Zustände von der Zeit t verzichtet. Ausgenommen hiervon sind Gleichungen, bei denen die Abhängigkeit von der Zeit zum Verständnis benötigt wird.

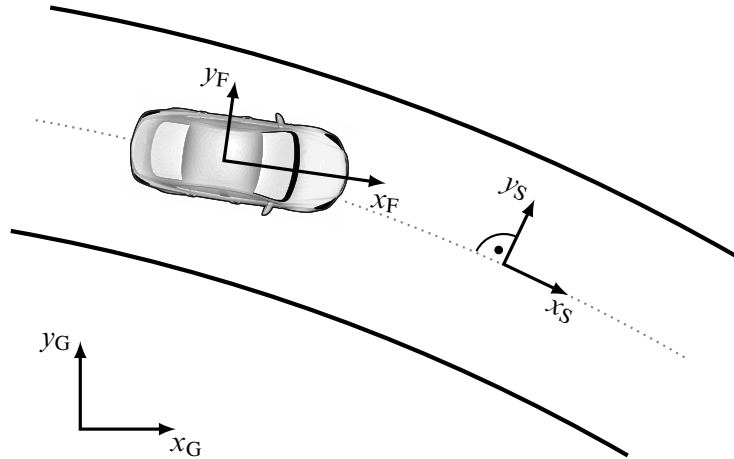


Bild 2.3: Übersicht der in dieser Arbeit verwendeten Koordinatensysteme.
 — Fahrstreifenmarkierung, Fahrstreifenmitte

2.3.1 Punktmassenmodell

Das Punktmassenmodell ist das einfachste physikalische Modell eines Fahrzeugs. Es beschreibt die eindimensionale Bewegung des Fahrzeugschwerpunkts. Zur Beschreibung einer Fahrzeugbewegung in der Ebene wird daher für jede der beiden Koordinatenrichtungen ein separates Punktmassenmodell verwendet. Das Punktmassenmodell ist linear und hat die Form einer Integrator-kette zweiter Ordnung:

$$\dot{\chi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \chi + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u. \quad (2.1)$$

Mit dem Zustandsvektor $\chi = [\chi \ \dot{\chi}]'$ sind Position und Geschwindigkeit die Zustände des Systems und die Beschleunigung u ist die Stellgröße.

2.3.2 Einspurmodell

Das Einspurmodell wurde bereits 1940 von Riekert u. a. eingeführt. Die Grundidee des Einspurmodells ist es, beide Räder einer Achse auf der Fahrzeuglängsachse zu einem fiktiven Rad zusammenzufassen, siehe Bild 2.4. Es ist somit identisch mit dem Modell eines Fahrrads und wird daher in der englischsprachigen Literatur oftmals auch als „Bicycle-Model“ (Fahrradmodell) bezeichnet. Des Weiteren wird angenommen, dass sich der Fahrzeugschwerpunkt auf Höhe der Straßenoberfläche befindet. Somit sind keine Nick- und Wankbewegungen, d. h. Drehungen um die y_F - bzw. x_F -Achse möglich. Es bleiben somit drei Freiheitsgrade, zwei translatorische in der Fahrbahnebene und ein rotatorischer orthogonal dazu. Die fahrzeugcharakteristischen Größen sind die Fahrzeugmasse m sowie die Abstände l_f bzw. l_h zwischen Vorder- bzw. Hinterachse und Fahrzeugschwerpunkt. Die dynamischen Größen zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung lassen sich in kinematische und kinetische Größen einteilen.

Zu den kinematischen Größen gehört die Fahrzeuggeschwindigkeit v . Der Winkel zwischen Geschwindigkeitsvektor und Fahrzeuglängsachse wird als Schwimmwinkel β bezeichnet. Als Gierwinkel bzw. Orientierung ψ wird der Winkel zwischen der Fahrzeuglängsachse und der X -Achse des globalen Koordinatensystems bezeichnet. Die Gierrate bzw. die Orientierungsänderung wird dementsprechend mit $\dot{\psi}$ dargestellt. Der Lenkwinkel an den Vorderrädern erhält die Bezeichnung δ .

Die kinetischen Größen beschreiben die an den Reifen angreifenden Kräfte. Diese lassen sich in Längskräfte $F_{x,f}$ bzw. $F_{x,h}$ und Seitenkräfte $F_{y,f}$ und $F_{y,h}$ aufteilen. Die Reifenkräfte entstehen durch Wechselwirkung des Reifens mit der Fahrbahnoberfläche.

Führt das Fahrzeug eine stationäre Kreisfahrt mit Radius r durch, so kann diese Bewegung als eine Drehung um den Momentanpol MP beschrieben werden. Fahrwiderstände wie Luftwiderstand, Steigung oder Reibung werden nicht modelliert. Der Grund hierfür ist, dass diese im Versuchsfahrzeug nicht exakt bestimmbar sind und durch die Regelung leicht kompensiert werden können.

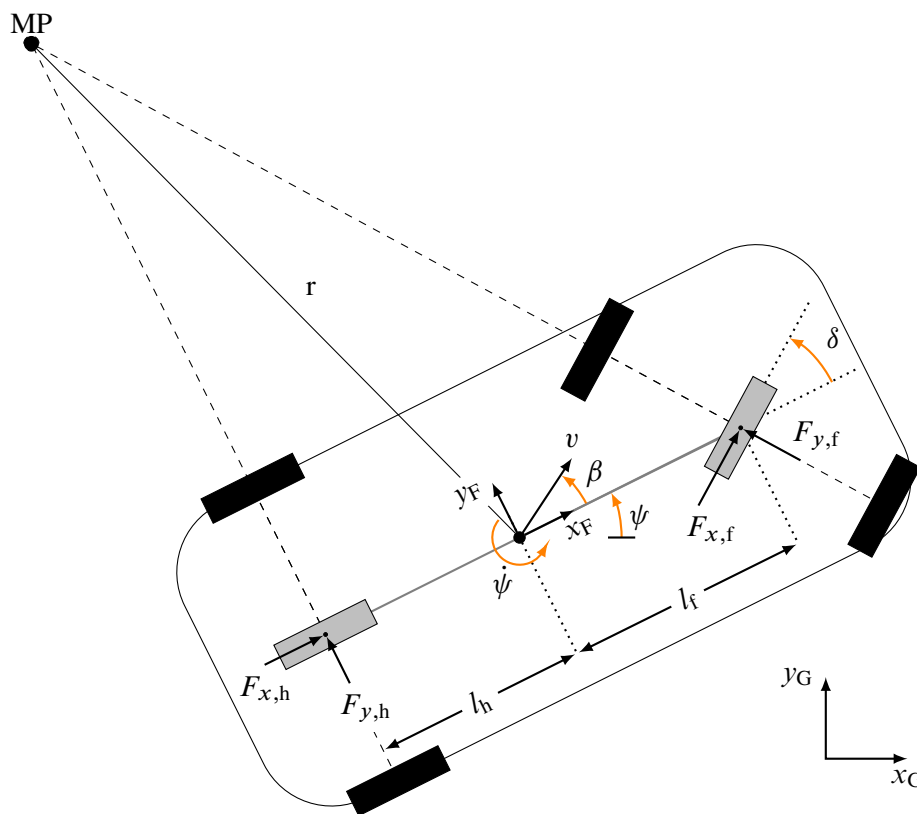


Bild 2.4: Einspurmodell: Die zwei Räder jeder Achse des Fahrzeugs (schwarz) werden jeweils zu einem virtuellen Rad (grau) zusammengeführt. Der Ursprung des Fahrzeugkoordinatensystems (schwarzer Punkt) ist zugleich der Fahrzeugschwerpunkt.

Kinematisches Einspurmodell

Das kinematische Einspurmodell [Rajamani, 2012; Schildbach u. a., 2015] beschreibt die Fahrzeugbewegung anhand kinematischer Zusammenhänge. Diese beruhen auf der Annahme, dass für

niedrige Fahrzeuggeschwindigkeiten die Winkelgeschwindigkeit und die Orientierungsänderung $\dot{\psi}$ des Fahrzeugs übereinstimmen. Die Fahrzeugbewegung ist nichtlinear und kann folgendermaßen angegeben werden:

$$\dot{\psi} = \frac{v}{r} = \frac{v}{l_f + l_h} \cos(\beta) \tan(\delta) \quad (2.2a)$$

$$\dot{v} = a_v, \quad (2.2b)$$

mit den Stellgrößen $u = [\delta, a_v]'$. Die am Schwerpunkt angreifende Beschleunigung in Richtung der Fahrzeuggeschwindigkeit v wird mit a_v bezeichnet. Um die Übersicht zu erhalten, ist diese nicht in Bild 2.4 dargestellt. Der Schwimmwinkel β ergibt sich aus geometrischen Beziehungen und kann wie folgt bestimmt werden:

$$\beta = \arctan\left(\frac{l_h}{l_f + l_h} \tan(\delta)\right). \quad (2.3)$$

Nichtlineares Kinetisches Einspurmodell

Die Bewegungsgleichungen des kinetischen Einspurmodells erhält man durch Aufstellen der Kräfte- und Momentengleichgewichte. Das Kräftegleichgewicht wird üblicherweise entweder in Fahrzeuglängsrichtung [Mitschke und Wallentowitz, 2014] oder in Richtung der Fahrzeuggeschwindigkeit [Fuchshumer, 2005] und orthogonal zu diesen aufgestellt. Das Momentengleichgewicht erfolgt stets um den Fahrzeugschwerpunkt. Wird das Kräftegleichgewicht in Richtung der Fahrzeuggeschwindigkeit aufgestellt, ergeben sich folgende Gleichungen:

Kräftegleichgewicht in Richtung der Fahrzeuggeschwindigkeit

$$m\dot{v} = -F_{y,f} \sin(\delta - \beta) + F_{x,f} \cos(\delta - \beta) + F_{y,h} \sin(\beta) + F_{x,h} \cos(\beta) \quad (2.4a)$$

Kräftegleichgewicht orthogonal zur Fahrzeuggeschwindigkeit

$$mv(\dot{\beta} + \dot{\psi}) = F_{y,f} \cos(\delta - \beta) + F_{x,f} \sin(\delta - \beta) + F_{y,h} \cos(\beta) - F_{x,h} \sin(\beta) \quad (2.4b)$$

Momentengleichgewicht um den Fahrzeugschwerpunkt

$$I_z \ddot{\psi} = -F_{y,h} l_h + F_{y,f} l_f \cos(\delta) + F_{x,f} l_f \sin(\delta) \quad (2.4c)$$

mit den Stellgrößen $[\delta, F_{x,f}, F_{x,h}]$. I_z beschreibt hierbei das Trägheitsmoment um die durch den Schwerpunkt gehende z_F -Achse. Im Versuchsfahrzeug ist es nicht möglich, die Längskräfte $F_{x,f}$ und $F_{x,h}$ getrennt voneinander zu stellen. Aus diesem Grund werden die beiden Kräfte durch folgende Beziehung mit einer einzigen Kraft abgebildet [Fuchshumer, 2005]:

$$F_{x,f} = \mu F_x \quad (2.5a)$$

$$F_{x,h} = (1 - \mu) F_x, \quad (2.5b)$$

wobei μ die Radkraftverteilung zwischen Vorder- und Hinterrad ist. Somit hat das Fahrzeug für $\mu = 1$ einen reinen Frontantrieb und für $\mu = 0$ einen reinen Heckantrieb. Damit reduziert sich der Stellgrößenvektor zu $[\delta, F_x]$.

Lineares Kinetisches Einspurmodell

Die Gleichungen (2.4a)–(2.4c) sind alle nichtlinear. In der Literatur werden diese oftmals so vereinfacht, dass lineare Gleichungen entstehen. Hierfür werden einerseits Terme mit geringem Einfluss vernachlässigt und zusätzlich angenommen, dass die Winkel β und δ klein sind und Kleinwinkelnäherungen für die trigonometrischen Funktionen gelten, z. B. $\sin(\beta - \delta) = \beta - \delta$ [Isermann, 2006]. Man erhält folgende Gleichungen:

$$\text{Längsbewegung:} \quad m\dot{v} = F_{x,f} + F_{x,h}, \quad (2.6a)$$

$$\text{Querbewegung:} \quad mv(\dot{\beta} + \dot{\psi}) = F_{y,f} + F_{y,h} \quad (2.6b)$$

$$I_z\ddot{\psi} = -F_{y,h}l_h + F_{y,f}l_f. \quad (2.6c)$$

2.3.3 Kinetisches Zweispurmodell

Um die Übersicht über die in der Literatur vorhandenen Fahrzeugmodelle zu vervollständigen, wird hier noch kurz auf das kinetische Zweispurmodell eingegangen. Der wesentliche Unterschied des Zweispurmodells gegenüber dem nichtlinearen kinetischen Einspurmodell liegt zum einen darin, dass der Fahrzeugschwerpunkt nicht auf Höhe der Fahrbahnoberfläche liegt, weshalb Nick- und Wankbewegungen möglich sind. Zum anderen werden die Räder nicht auf einer virtuellen Achse zusammengefasst, wodurch es z. B. auch möglich ist Allradlenkungen abzubilden, d. h. jedes Rad kann individuell gelenkt werden. Damit erhöht sich die Anzahl der Freiheitsgrade von drei auf sechs und die Komplexität des Modells nimmt erheblich zu. Details zum Zweispurmodell sind bei Hoedt [2013], Mitschke und Wallentowitz [2014] sowie Isermann [2006] zu finden und werden an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt.

2.4 Auswahl der Modelle

Für die Auswahl der Modelle gilt der Grundsatz „so genau wie nötig, so einfach wie möglich“. Ziel ist es, eine möglichst einfache Grundlage zu schaffen, mit deren Hilfe sowohl die Trajektorienplanung als auch die Fahrzeugführung die an sie gestellten Anforderungen erfüllen können. Die Anforderungen werden im folgenden zuerst aufgestellt und anschließend dazu verwendet, ein passendes Modell auszuwählen.

2.4.1 Grundlegendes Fahrzeugmodell für die Trajektorienplanung

Anforderungen: Die Hauptaufgabe der Planung einer Trajektorie ist das Finden eines kollisionsfreien Pfades in Abhängigkeit der Zeit. Dies kann prinzipiell unabhängig von einem Fahrzeugmodell geschehen, wenn darauf geachtet wird, dass die sich ergebende Trajektorie für das Fahrzeug fahrbar ist. Die Trajektorie soll allerdings nicht nur kollisionsfrei, sondern auch für den Fahrer möglichst angenehm zu fahren sein. Daher ist es notwendig, dass z. B. vorgegebene Beschleunigungsgrenzen eingehalten werden. Darüber hinaus muss die Trajektorie fahrbar sein, d. h. das Fahrzeug muss zumindest theoretisch in der Lage sein, der Trajektorie zu folgen. Aufgrund der sich permanent verändernden Verkehrssituation ist es notwendig, die Trajektorie zyklisch neu zu berechnen. Für die Berechnung steht jedoch nur eine begrenzte Rechenkapazität zur Verfügung. Deshalb sind Modelle zu bevorzugen, die keine rechenaufwendigen Lösungen benötigen.

Auswahl: Gemeinsam haben alle Modelle, dass sie in der Lage sind, Beschleunigungsbegrenzungen abzubilden. Des Weiteren sind die innerhalb dieser Arbeit betrachteten Szenarien weit von den fahrphysikalischen Grenzen entfernt. Deshalb sind die detaillierten Gleichungen der nichtlinearen Modelle nicht notwendig, um fahrbare Trajektorien zu generieren. Die Trajektorienplanung erfolgt in der Regel durch das Lösen eines Optimierungsproblems. Durch die Verwendung nichtlinearer Fahrzeugmodelle wird das Optimierungsproblem ebenso nichtlinear und die Lösung sehr rechenintensiv. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Komplexität der nichtlinearen Modelle einerseits nicht notwendig ist und andererseits voraussichtlich eine rechenintensive Bestimmung der Trajektorien mit sich bringt. Demgegenüber stehen das Punktmassenmodell und das lineare Einspurmodell. Beide sind sehr einfach und erfüllen alle Anforderungen. Bei dem Punktmassenmodell ist jedoch eine größere Freiheit bei der Auswahl des Konzepts für die Trajektorienplanung zu erwarten; so können mit diesem Modell bspw. beliebige zweifach stetig differenzierbare Kurven verwendet werden. Aus diesem Grund wird für die Trajektorienplanung das Punktmassenmodell verwendet. Die Eignung des Punktmassenmodells wird auch in aktuellen Arbeiten wie z. B. [Hansen, 2018] oder [Werling, 2011] auf diesem Gebiet bestätigt.

2.4.2 Grundlegendes Fahrzeugmodell für die Fahrzeugführung

Anforderungen: Die Hauptaufgabe der Regelung ist das exakte Führen des Fahrzeugs entlang der Trajektorie. Hierfür muss speziell die Dynamik der Querbewegung ausreichend genau beschrieben werden. Dazu gehört auch, dass die Kopplung zwischen Längs- und Querdynamik im Modell berücksichtigt wird. Außerdem soll die Regelung über den gesamten in dieser Arbeit betrachteten Geschwindigkeitsbereich gültig sein. Dies muss ebenso für das Modell gelten.

Auswahl: Das Punktmassenmodell enthält weder die Kopplung zwischen Längs- und Querdynamik noch bildet es die Fahrzeugdynamik ausreichend ab. Ähnliches gilt für das lineare Einspurmodell. Es bildet die Fahrzeugdynamik ausreichend ab, ist aber nur in einem kleinen Arbeitsbereich gültig. Es bleiben somit die nichtlinearen Modelle. Das kinematische Modell basiert auf der Annahme niedriger Geschwindigkeiten. Dies führt dazu, dass die Regelgüte bei hohen Geschwindigkeiten abnimmt [Kong u. a., 2015]. Deshalb empfehlen Kong u. a. die Verwendung des nichtli-

nearen Einspurmodells. Auch das Zweispurmodell bietet die benötigte Genauigkeit. Durch seine sechs Freiheitsgrade ist es jedoch deutlich komplexer als das Einspurmodell und besitzt zudem einige mit Seriensensorik nicht messbare Zustände, wie z. B. den Wankwinkel. Dies erschwert den Entwurf der Fahrzeugführung deutlich, wodurch es keine Alternative zum Einspurmodell bietet.

2.5 Reifenmodell

Die Reifenlängskraft F_x kann indirekt über die Beschleunigung des Fahrzeugs gemessen und mit ausreichender Genauigkeit über Motor und Bremse eingestellt werden. Ein Reifenmodell in Längsrichtung wird deshalb nicht verwendet. Für die Reifenseitenkraft ist dies nicht möglich. Zur Bestimmung der Seitenkraft zur Laufzeit muss diese entweder durch eine Kennlinie hinterlegt oder durch ein Modell abgebildet werden [Mitschke und Walentowitz, 2014]. Vollständige Kennlinien stehen häufig nicht zur Verfügung, weshalb in dieser Arbeit ein Reifenmodell verwendet wird. Reifenmodelle haben den Vorteil, dass nur wenige Parameter zu bestimmen sind. Eine typische Kennlinie für die Reifenseitenkraft in Abhängigkeit des Schräglaufwinkels ist in Bild 2.6 gezeigt. Die Definition des Schräglaufwinkels ist in Bild 2.5 zu sehen. Für die vollständige Beschreibung der Kennlinie in Bild 2.6 wird ein nichtlineares Modell benötigt. Das in der Literatur am häufigsten verwendete Modell ist die Magic Tyre Formula von Pacejka [2006]:

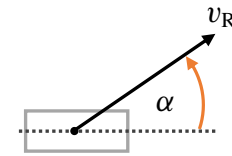


Bild 2.5: Definition des Schräglaufwinkels α . v_R : Geschwindigkeit im Radaufstandspunkt.

$$F_{y,\iota} = D_\iota \sin[C_\iota \arctan\{B_\iota \alpha_\iota - E_\iota(B_\iota \alpha_\iota - \arctan B_\iota \alpha_\iota)\}], \quad \iota \in \{f, h\}. \quad (2.7)$$

B_ι , C_ι , D_ι und E_ι beschreiben die zu bestimmenden Parameter der Reifenkennlinie. Eine charak-

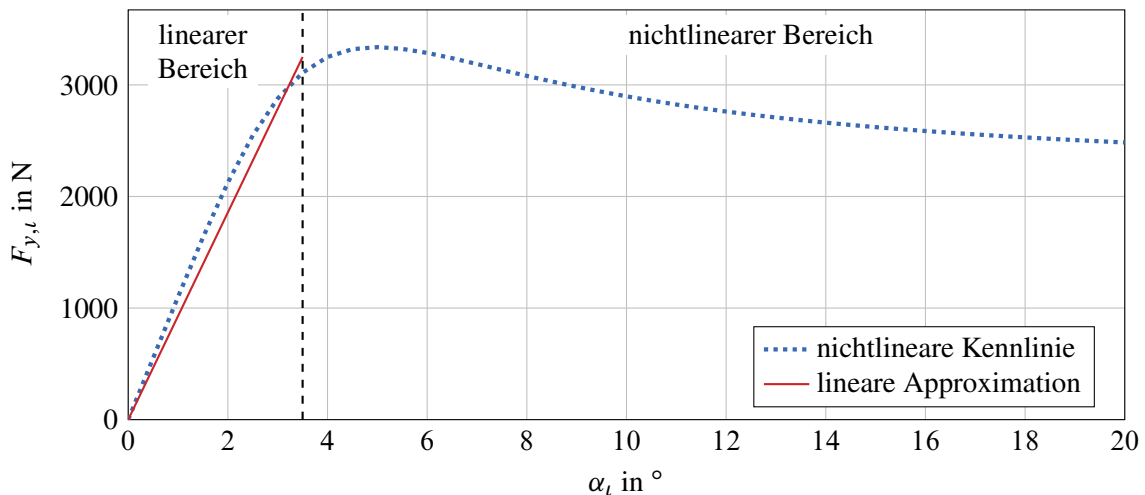


Bild 2.6: Reifenseitenkraft in Abhängigkeit des Schräglaufwinkels mit $\iota \in \{f, h\}$

teristische Eigenschaft dieser Kennlinie ist der nahezu lineare Anstieg für kleine Schräglaufwinkel ($|\alpha| < 3 - 4^\circ$) [Mitschke, 2005], siehe Bild 2.6. Dieser lineare Bereich der Reifenseitenkraft gilt

für Querschleunigungen $|a_y^F| < 0,4 \text{ g}$ (ca. 4 m/s^2) auf trockener Straße. Die in dieser Arbeit betrachteten Manöver weisen nur eine geringe Dynamik auf. Ihre maximalen Querschleunigungen liegen im Normalfall deutlich unterhalb dieses Grenzwertes im Bereich von $|a_y^F| \approx 0,1 \text{ g}$. Es somit ausreichend, nur den linearen Bereich der Reifenkennlinie abzubilden. Für den linearen Bereich der Kennlinie ist es möglich, eine Kleinwinkelnäherung auf die Magic Tyre Formula (2.7) anzuwenden:

$$F_{y,l} = \underbrace{D_l C_l B_l}_{:=c_{\alpha_l}} \alpha_l = c_{\alpha_l} \alpha_l. \quad (2.8)$$

Das sich ergebende Modell ist das lineare Reifenmodell mit der Schräglaufsteifigkeit c_{α_l} . Die Bestimmung der Schräglaufwinkel erfolgt durch Aufstellen von geometrischen Beziehungen am Vorder- und Hinterrad [Isermann, 2006]:

$$\alpha_f = \delta - \arctan \left(\frac{l_f \dot{\psi} + v \sin \beta}{v \cos \beta} \right) \quad (2.9a)$$

$$\alpha_h = \arctan \left(\frac{l_h \dot{\psi} - v \sin \beta}{v \cos \beta} \right). \quad (2.9b)$$

2.6 Fahrstreifenrelative Dynamik

Die in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Bewegungsgleichungen beschreiben bisher nur die fahrdynamischen Größen. Zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung auf der Straße müssen diese Gleichungen erweitert werden. Bisher wurde dies speziell in der Literatur zur gekoppelten Längs- und Querdynamikmodellierung meist durch Hinzufügen der globalen Position erreicht. Die Änderungsrate der globalen Position kann folgendermaßen berechnet werden:

$$\dot{x} = v \cos(\psi + \beta) \quad (2.10a)$$

$$\dot{y} = v \sin(\psi + \beta). \quad (2.10b)$$

Die globale Position erweist sich allerdings für das automatisierte Fahren auf der Straße als ungünstig. Sie ist nur mit spezieller Sensorik in ausreichender Güte messbar. Diese steht in einem Serienfahrzeug i. d. R. nicht zur Verfügung. Zudem ist die globale Position beim Befahren der Straße nicht von besonderer Bedeutung. Die beiden relevanten Größen sind die Geschwindigkeit des Fahrzeugs sowie der Abstand zur Fahrstreifenmitte, im Folgenden mit Querablage d bezeichnet. Für den Fall, dass einem vorausfahrenden Fahrzeug gefolgt werden soll, ist auch der Abstand zu diesem Fahrzeug von Bedeutung. Dieser wird bei Bedarf durch Integration der Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt. Die Geschwindigkeit ist bereits Bestandteil der fahrdynamischen Größen und muss somit nicht mehr zusätzlich hinzugefügt werden. Um die Dynamik der Querablage zu beschreiben wird zusätzlich noch der fahrstreifenrelative Gierwinkel ψ_t benötigt. Dieser beschreibt den Winkel zwischen der Tangente der Fahrstreifenmittellinie an der aktuellen Position

im Fahrstreifen und der Fahrzeuglängsachse, siehe Bild 2.7. Es ergibt sich folgende Dynamik:

$$\dot{\psi}_t = \dot{\psi} - v \cos(\psi_t + \beta) \kappa(t) \quad (2.11)$$

$$\dot{d} = v \sin(\psi_t + \beta), \quad (2.12)$$

mit der zeitvariablen Straßenkrümmung $\kappa(t)$.

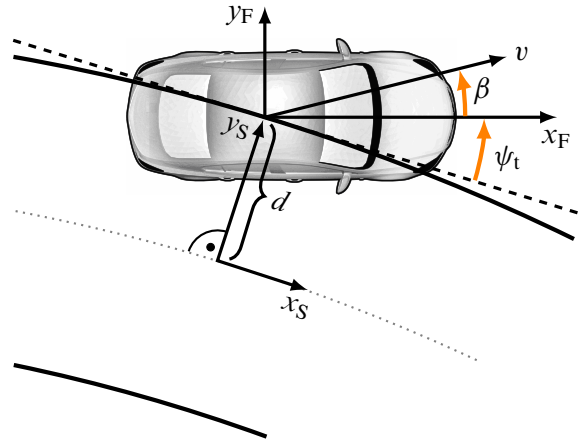


Bild 2.7: Darstellung der Größen der fahrstreifenrelativen Dynamik. — Fahrstreifenmarkierung, Fahrstreifenmitte, --- Tangente der Fahrstreifenmittellinie an der aktuellen Position.

2.7 Modellierung der Aktoren

Um ein möglichst genaues Folgen der Trajektorie zu gewährleisten, müssen die Aktoren mit ausreichender Güte modelliert werden. Eine exakte Modellierung der Aktoren ist jedoch aus zwei Gründen nicht sinnvoll. Erstens sind die internen Zustände der Aktoren im Fahrzeug nicht messbar, und zweitens erschwert eine zu detaillierte Modellierung der Aktoren den Reglerentwurf erheblich. Aus diesen Gründen erfolgt die Modellierung durch Bestimmen einer Übertragungsfunktion für die Aktoren. Dies erfolgt anhand von Sprungantworten, die mit dem Versuchsfahrzeug aufgenommen wurden.

2.7.1 Motordynamik

Die Motordynamik wurde unter Verwendung ihrer Sprungantwort identifiziert. Bei Vorgabe einer mittleren Beschleunigung erhält man das in Bild 2.8 dargestellte Verhalten. Dieses Verhalten kann durch ein simples Modell beschrieben werden, das aus einem Verzögerungsglied erster Ordnung (PT1-Glied) mit einer Totzeit besteht [Germann, 1997]:

$$\dot{F}_x(t) = -\frac{1}{\tau_m} F_x(t) + \frac{K_m}{\tau_m} F_{x,s}(t - \tau_t). \quad (2.13)$$

$F_{x,s}$ ist die angeforderte Kraft bzw. die Stellgröße und F_x die aktuell gemessene Längskraft.

Die Verstärkung K_m und die Zeitkonstante τ_m sind die Parameter des Verzögerungsglieds, und die von der Motordrehzahl abhängige Totzeit ist durch τ_t gegeben. Die Drehzahlabhängigkeit ist jedoch gering und wird deshalb im Weiteren vernachlässigt. Die nicht minimalphasige Totzeit erschwert allerdings die Reglerauslegung. Um dies zu vermeiden wird die Totzeit durch ein lineares Verzögerungsglied erster Ordnung, wie in Föllinger u. a. [2016] beschrieben, angenähert. In Bild 2.9 ist das Bodediagramm einer Totzeit und das eines PT1-Glieds abgebildet. Es ist klar

zu sehen, dass die Verstärkung der Totzeit konstant ist, wohingegen die Verstärkung der linearen Annäherung der Totzeit mit zunehmender Frequenz abnimmt. Die 3-dB-Grenzfrequenz liegt bei einer Totzeit $\tau_t = 0,2$ s bei 5 rad/s. Dies stellt allerdings kein Problem dar. Gleichung (2.13) besitzt bereits ein PT1-Glied, das die Eingangsfrequenzen stärker begrenzt als die PT1-Approximation der Totzeit. Ersetzt man die Totzeit in (2.13) wie beschrieben durch ein PT1-Glied, erhält man ein lineares System zweiter Ordnung (PT2-Glied) (vgl. Bild 2.8):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} F_x \\ \dot{F}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{F}_x \\ -\frac{\tau_t + \tau_m}{\tau_t \tau_m} \dot{F}_x - \frac{1}{\tau_t \tau_m} F_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_m}{\tau_t \tau_m} \end{bmatrix} F_{x,s}. \quad (2.14)$$

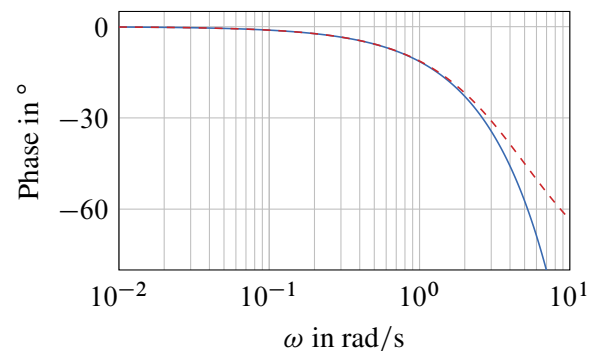
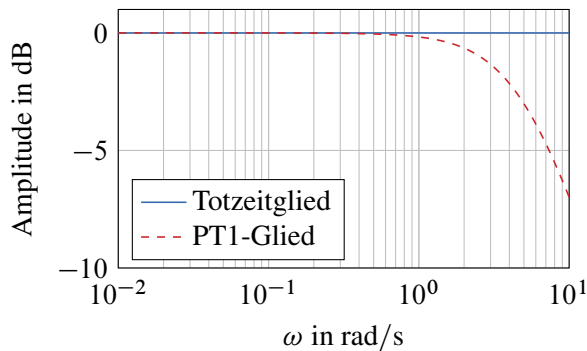


Bild 2.9: Vergleich eines Totzeitglieds und eines PT1-Glieds für eine Totzeit von 0,2 s. Bild nach [Stanchev, 2017].

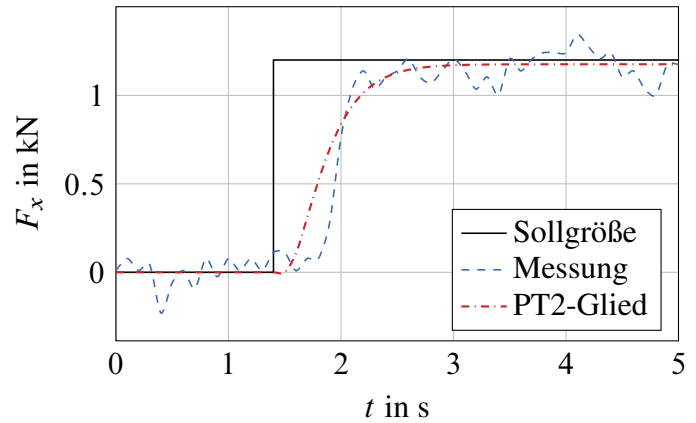


Bild 2.8: Vorgabe einer sprungförmigen mittleren Beschleunigung von 1,2 kN

2.7.2 Bremsdynamik

Die Bremsdynamik wurde analog zur Motordynamik anhand ihrer Sprungantwort identifiziert. Bei Vorgabe einer mittleren Verzögerung ergibt sich das in Bild 2.10 dargestellte Verhalten. Charakteristisch für die Sprungantwort ist das starke Überschwingen. Dies wurde bei der Identifizierung nicht berücksichtigt, da es sehr individuell für jeden Bremsvorgang ist. Im Wesentlichen hängt das Verhalten der Bremsdynamik nur vom Aufbau des Bremsdrucks ab und kann wie folgt beschrieben werden [Germann, 1997]:

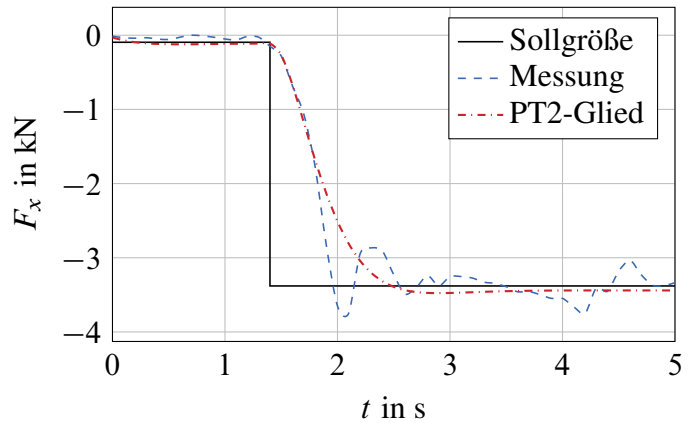


Bild 2.10: Vorgabe einer sprungförmigen mittleren Verzögerung von 3,4 kN

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} F_x \\ \dot{F}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{F}_x \\ -2D_b\omega_b\dot{F}_x - \omega_b^2 F_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_b\omega_b^2 \end{bmatrix} F_{x,s}. \quad (2.15)$$

Die Dämpfung D_b , die Verstärkung K_b und die Eigenfrequenz ω_b sind die Parameter des PT2-Glieds.

2.7.3 Vereinheitlichung der Dynamik der Aktoren in Längsrichtung

Um sowohl Motordynamik als auch Bremsdynamik im Modell zu berücksichtigen, ist es notwendig, zwei Modelle zu erstellen. Dies bringt allerdings zwei entscheidende Nachteile mit sich. Einerseits muss dadurch bei der Regelung zwischen einer beschleunigenden und einer verzögernden Bewegung unterschieden werden. Das bedeutet, dass zwischen zwei Reglern hin und her geschaltet wird. Andererseits ist es somit notwendig, für die Längsdynamik die doppelte Anzahl an Reglerparametern einzustellen. Die Übertragungsfunktion des Motors und der Bremse sind sowohl qualitativ als auch quantitativ sehr ähnlich (vgl. Bild 2.8 und Bild 2.10). Daher wird die Motordynamik und die Bremsdynamik durch dasselbe PT2-Glied mit folgender Form abgebildet:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} F_x \\ \dot{F}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{F}_x \\ -2D_{bm}\omega_{bm}\dot{F}_x - \omega_{bm}^2 F_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_{bm}\omega_{bm}^2 \end{bmatrix} F_{x,s}. \quad (2.16)$$

Die Dämpfung D_{bm} , die Verstärkung K_{bm} und die Eigenfrequenz ω_{bm} sind die Parameter des PT2-Glieds.

2.7.4 Lenkdynamik

Der für das in Abschnitt 2.3.2 beschriebene Einspurmodell benötigte Lenkwinkel δ ist der Lenkwinkel an den Vorderrädern. Dieser ist im Fahrzeug nicht messbar. Allerdings sind die Vorderräder mit dem Lenkrad mechanisch verbunden. Diese Verbindung wird näherungsweise als steif und von der Fahrzeuggeschwindigkeit unabhängig betrachtet. Der Lenkwinkel unterscheidet sich somit vom Lenkradwinkel nur durch die konstante Lenkübersetzung i_L . Der Lenkwinkel kann folglich durch Messung des Lenkradwinkels bestimmt werden. Das Lenkwinkelübersetzungsverhältnis ergibt sich dabei zu

$$i_L = \frac{\delta_L}{\delta}. \quad (2.17)$$

Der Lenkradwinkel wird im Fahrzeug durch einen unterlagerten Lenkradwinkelregler gestellt. Dessen Übertragungsverhalten hat ein dominantes Polpaar. Aus diesem Grund wird die Lenkdynamik, ebenso wie bereits die beiden Längsaktoren, durch ein PT2-Glied modelliert:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ -2D_1\omega_1\dot{\delta} - \omega_1^2\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_1\omega_1^2 \end{bmatrix} \delta_s. \quad (2.18)$$

Dabei ist δ_s der Eingang bzw. die Stellgröße, D_1 die Dämpfung, K_1 die Verstärkung und ω_1 die Eigenfrequenz des PT2-Glieds. In Bild 2.11 ist eine Sprungantwort des Lenkaktors dargestellt. Ein Lenkwinkel von 0,006 rad entspricht hierbei einem Lenkradwinkel von ca. 5°.

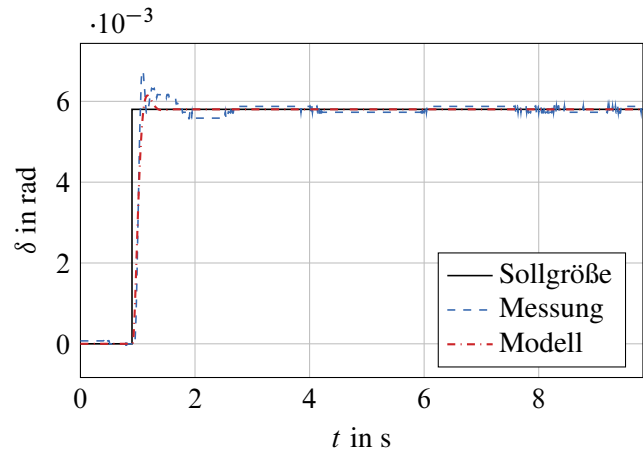


Bild 2.11: Vorgabe eines Lenkwinkelsprungs bei einer Geschwindigkeit von 70 km/h

2.8 Vollständiges Fahrzeugmodell

In Abschnitt 2.3 wurden verschiedene grundlegende Fahrzeugmodelle vorgestellt und in den darauffolgenden Abschnitten die passenden Modelle für Trajektorienplanung und Fahrzeugführung ausgewählt. Anschließend wurden noch ein Reifenmodell, die fahrstreifenrelative Dynamik und die Modellierung der Aktoren (Abschnitte 2.5 – 2.7) vorgestellt. Diese Komponenten werden im Folgendem zu einem einzigen Modell zusammengeführt, so dass sich ein vollständiges Fahrzeugmodell sowohl für die Trajektorienplanung als auch für die Regelung ergibt.

2.8.1 Vollständiges Fahrzeugmodell für die Trajektorienplanung

Das in Abschnitt 2.4.1 ausgewählte Punktmassenmodell (vgl. (2.1)) beruht auf kinematischen Beziehungen. Eine Modellierung von Reifenkräften ist somit nicht notwendig. Deshalb wird das Modell lediglich um die Aktordynamik ergänzt. Der Hauptgrund für die Wahl des Punktmassenmodells in Abschnitt 2.4 war seine Einfachheit. Ziel ist es diese Einfachheit zu erhalten, da es hierdurch möglich ist, in Kapitel 3 eine sehr einfache analytische Lösung zu erhalten. Aus diesem Grund wird das Punktmassenmodell nicht eins zu eins um die Aktordynamik erweitert, sondern lediglich die Integratorkette um zwei Zustände erweitert. Dadurch geht die Beschreibung des verzögernden Aufbaus der Stellgrößen verloren. Das Hinzufügen der „vereinfachten Aktordynamik“ ist dennoch sinnvoll, da dadurch die berechneten Trajektorien im Vergleich zum Modell aus Kapitel 2.3.1 bis zur dritten Ableitung und nicht nur bis zur ersten Ableitung stetig sind. Als vollständiges Modell ergibt sich eine Integratorkette vierter Ordnung:

$$\dot{\mathbf{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{x}, u)} \mathbf{x} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_{\text{vereinfachte Aktordynamik}} u \quad \left. \vphantom{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}} \right\} \begin{array}{l} \text{grundlegendes Fahrzeugmodell} \\ \text{vereinfachte Aktordynamik} \end{array} \quad (2.19)$$

2.8.2 Vollständiges Fahrzeugmodell für die Fahrzeugführung

Bei der Fahrzeugführung werden sowohl das Reifenmodell, die fahrstreifenrelative Dynamik als auch die Aktordynamik zur Vervollständigung des grundlegenden Modells benötigt. Im Gegensatz zur Trajektorienplanung werden die vorgestellten Erweiterungen eins zu eins hinzugefügt, siehe Gleichung (2.20). Das vollständige Modell hat neun Zustände $\mathbf{x} = [d \ \psi_t \ \dot{\psi} \ \beta \ v \ \delta \ \dot{\delta} \ F_x \ \dot{F}_x]'$ und zwei Stellgrößen $\mathbf{u} = [\delta_s \ F_{x,s}]'$. Als Ausgang \mathbf{y} für die später zu entwerfende Fahrzeugführung werden die Querablage und die Fahrzeuggeschwindigkeit gewählt. Durch die zeitabhängige Straßenkrümmung $\kappa(t)$ weist das vollständige Modell (2.20) insgesamt ein zeitvariantes nichtlineares Verhalten auf. Die Erweiterung des grundlegenden Fahrzeugmodells um die Aktordynamiken hat neben der offensichtlich verbesserten Beschreibung der Fahrzeugbewegung auch einen entscheidenden strukturellen Vorteil. Die Aktordynamiken sind eingangsaffin, und somit ist auch das vollständige Fahrzeugmodell eingangsaffin, d. h. es ist affin bzgl. der Stellgröße \mathbf{u} . Diese Eigenschaft ist für den Regelungsentwurf in Abschnitt 4.3 sehr vorteilhaft. Ohne Aktordynamik erreicht man dies nur durch Vernachlässigung aller nicht eingangsaffinen Terme [Mayr, 1991; Menhour

u. a., 2014; Schorn, 2007]. Eine detaillierte Variante des vollständigen Einspurmodells inklusive eingesetztem Reifenmodell ist in Anhang A.1 zu finden.

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} d \\ \psi_t \\ \dot{\psi} \\ \beta \\ v \\ \delta \\ \dot{\delta} \\ F_x \\ \dot{F}_x \end{bmatrix}}_{\dot{\mathbf{x}}} = \underbrace{\begin{bmatrix} v \sin(\psi_t + \beta) \\ \dot{\psi} - v \cos(\psi_t + \beta) \kappa(t) \\ \frac{-F_{y,h} l_h + F_{y,f} l_f \cos(\delta) \dots}{I_z} \\ -\dot{\psi} + \frac{F_{y,f} \cos(\delta - \beta) \dots}{mv} \\ \frac{-F_{y,f} \sin(\delta - \beta) + F_{x,f} \dots}{m} \\ \dot{\delta} \\ -2D_1 \omega_1 \dot{\delta} - \omega_1^2 \delta \\ \dot{F}_x \\ -2D_{bm} \omega_{bm} \dot{F}_x - \omega_{bm}^2 F_x \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}(\mathbf{x}, \kappa(t))} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ K_1 \omega_1^2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K_{bm} \omega_{bm}^2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u}} \underbrace{\begin{bmatrix} \delta_s \\ F_{x,s} \end{bmatrix}}_{\mathbf{u}} \quad (2.20a)$$

$\left. \begin{array}{l} \text{fahrstreifenrelative} \\ \text{Dynamik} \end{array} \right\}$
 $\left. \begin{array}{l} \text{grundlegendes} \\ \text{Fahrzeugmodell} \end{array} \right\}$
 $\left. \begin{array}{l} \text{Lenkdynamik} \end{array} \right\}$
 $\left. \begin{array}{l} \text{vereinheitlichte} \\ \text{Längsaktordyna-} \\ \text{mik} \end{array} \right\}$

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) = [y_1 \ y_2]' = [v \ d]'. \quad (2.20b)$$

2.9 Modellplausibilisierung

Das im vorangegangenen Abschnitt eingeführte vollständige Einspurmodell soll in diesem Abschnitt plausibilisiert werden. Auf eine Plausibilisierung des Punktmassenmodells wird verzichtet. Es wurde nicht dazu entworfen, die Fahrzeugbewegung rekonstruieren zu können, sondern um fahrbare Trajektorien zu generieren. Die Plausibilisierung des vollständigen Modells erfolgt anhand eines für die Autobahn typischen Szenarios. Die Plausibilisierung wird im Folgenden bei einer mittleren Geschwindigkeit von ca. 70 km/h präsentiert. Ähnliche Ergebnisse wurden über den gesamten Geschwindigkeitsbereich erzielt.

2.9.1 Plausibilisierung des vollständigen Fahrzeugmodells

Die Plausibilisierung des vollständigen Modells erfolgt anhand eines Fahrstreifenwechsels mit einer mittleren Beschleunigung am Ende des Fahrstreifenwechsels. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung der Messwerte mit dem Modell zu sehen. Der Schwimmwinkel ist im Fahrzeug nicht

messbar und wird mit Hilfe eines Beobachters bestimmt. Daher wird als zusätzliche Größe zur Beurteilung der Querdynamik die Querschleunigung des Fahrzeugs a_y betrachtet. Sie beschreibt die Fahrzeugquerdynamik sehr gut und ist im Fahrzeug zuverlässig messbar.

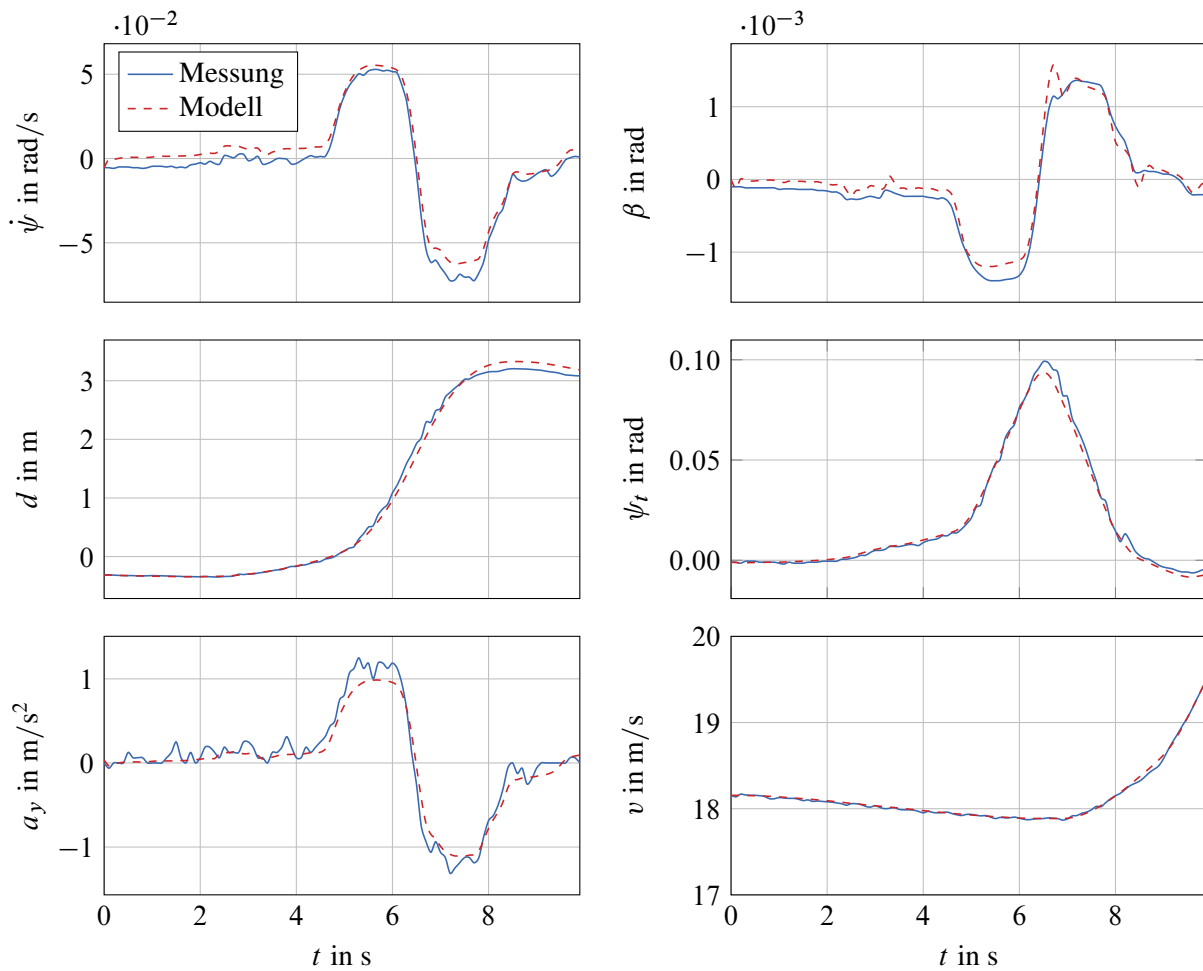


Bild 2.12: Plausibilisierung des Modells anhand eines Fahrstreifenwechselszenarios

3 Kombinierte Längs- und Quertrajektorienplanung

Zu Beginn dieses Kapitels wird eine kurze Einführung in die Thematik der Trajektorienplanung gegeben. Hierbei werden die allgemeine Formulierung und die zentrale Herausforderung der Trajektorienplanung beschrieben. Aufbauend auf diese Einführung werden Kriterien erarbeitet, anhand derer das eigene Konzept entworfen wird. Das eigene Konzept basiert auf zwei bestehenden Konzepten zur Trajektorienplanung. Diese werden noch kurz etwas genauer betrachtet, bevor abschließend das eigene Konzept vorgestellt wird. Das Grundkonzept des Trajektorienplaners wurde bereits in [Schucker und Konigorski, 2019a] veröffentlicht.

3.1 Allgemeine Einführung in die Trajektorienplanung

Die Trajektorienplanung im Rahmen dieser Arbeit kann analog zu Schouwenaars [2005] definiert werden:

Die Trajektorienplanung ist die Bestimmung des optimalen Weges in Abhängigkeit der Zeit zu einem gewünschten Endzustand basierend auf der aktuellen Situation, d. h. dem aktuellen eigenen Zustand und einer aktuellen Beschreibung der Umgebung. Die Bestimmung der optimalen Lösung erfolgt in Echtzeit unter Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs sowie der Kollisionsfreiheit.

Um eine optimale Trajektorie zu bestimmen muss eine Kostenfunktion aufgestellt werden, anhand derer die Güte der Trajektorie bewertet wird. Hierfür wird die Optimierungstheorie verwendet, die im Folgenden anhand von [Graichen, 2012] und [Papageorgiu u. a., 2015] eingeführt wird. Die Aufstellung einer Kostenfunktion kann grundsätzlich innerhalb eines dynamischen oder statischen Optimierungsproblems erfolgen. Die Formulierung der beiden Optimierungsprobleme ist sehr ähnlich und ist für das dynamische Optimierungsproblem gegeben durch:

$$\min_{u(\cdot)} \quad J(u) = \underbrace{\rho(\chi(t_e), t_e)}_{\text{Endkosten}} + \underbrace{\int_{t_0}^{t_e} l(\chi(t), u(t), t) dt}_{\text{Integralkosten}} \quad \text{Kostenfunktional} \quad (3.1a)$$

$$\text{u. B. v.} \quad \dot{\chi}(t) = \tilde{\mathbf{f}}(\chi(t), u(t), t), \quad \chi(t_0) = \chi_0 \quad \text{Systemdynamik} \quad (3.1b)$$

$$\mathbf{m}(\chi_e, t_e) = 0 \quad \text{Endbedingungen} \quad (3.1c)$$

$$\mathbf{n}(\chi(t), u(t), t) \leq 0, \quad \forall t \in [t_0 \ t_e] \quad \text{Nebenbedingungen.} \quad (3.1d)$$

Ziel der dynamischen Optimierung ist es, eine Funktion $u(t)$ der unabhängigen Variable t zu finden, die das Kostenfunktional optimiert. Die unabhängige Variable ist oftmals die Zeit, wovon sich auch die Bezeichnung dynamische Optimierung ableitet. Dies ist auch der entscheidende Unterschied zur statischen Optimierung. Bei dieser stellt die Optimierungsvariable ein Element eines euklidischen Raumes dar, z. B. den Parametersatz eines Modells. Für den Fall der Trajektorienplanung für automatisiertes Fahren beschreibt die gesuchte Funktion $u(t)$ die Stellgröße der in Kapitel 2 eingeführten Fahrzeugmodelle. Es wird somit eine Trajektorie für die Stellgröße und nicht für den Ausgang des Systems bestimmt. Die letztere ergibt sich anschließend mit Hilfe der in (3.1b) festgelegten Systemdynamik. Die Endkosten ermöglichen es, den finalen Zustand der Trajektorie nochmals separat zu bestrafen, z. B. um einen sicheren Endzustand gewährleisten zu können. Die Integralkosten hingegen bestimmen maßgeblich den Verlauf bzw. die Form der Trajektorie. Mit den Nebenbedingungen wird sichergestellt, dass die Trajektorie kollisionsfrei ist und die Beschleunigungsgrenzen eingehalten werden. Die Endzeit t_e , auch Optimierungshorizont genannt, kann fest oder frei sein. Wird die Endzeit frei gewählt, ist sie Teil der Lösung des Optimierungsproblems. Da die Endzeit auch die Dauer bzw. Länge eines Manövers beschreibt, wird sie im Folgenden auch Manöverdauer oder Manöverlänge genannt.

Die große Herausforderung bei der Bestimmung der Trajektorie ist das Finden der optimalen Steuerungsfolge. Im Idealfall kann eine analytische Lösung des Optimalsteuerungsproblems mit Hilfe der Variationsrechnung oder Pontryagins Maximumprinzip gefunden werden. Diese stellen für die Bestimmung der Lösung geeignete Optimalitätsbedingungen zur Verfügung. Die eindeutige Lösung steht somit fest und muss nicht mehr zur Laufzeit bestimmt werden. Im Regelfall ist es jedoch nicht möglich, eine analytische Lösung zu finden. Aus diesem Grund greift man auf numerische Verfahren zurück. Diese lassen sich für dynamische Optimierungsprobleme grundsätzlich in zwei Kategorien aufteilen:

- **Indirekte Verfahren**

Indirekte Verfahren verwenden die Optimalitätsbedingungen der Variationsrechnung bzw. von Pontryagins Maximumprinzip. Der wesentliche Vorteil der indirekten Verfahren ist, dass ihre Lösungen eine hohe Genauigkeit aufweisen. Zur Bestimmung der Lösung muss jedoch zunächst ein geeigneter Startwert gefunden werden, was im Allgemeinen nicht trivial ist. Zusätzlich hat das indirekte Verfahren den Nachteil, dass es einen kleinen Konvergenzbereich aufweist und das Aufstellen der Nebenbedingungen umständlich ist.

- **Direkte Verfahren**

Direkte Verfahren reduzieren das dynamische Optimierungsproblem auf ein statisches Optimierungsproblem, indem sie die Steuerfunktion u diskretisieren. Das entstehende statische Ersatzproblem wird anschließend mit Methoden der statischen Optimierung gelöst. Die entstehenden Ersatzsysteme sind oftmals größer und benötigen eine hohe Rechenleistung. Durch die in den letzten Jahren verbesserte und auch durch die in der Zukunft zu erwartende zunehmende Rechenleistung werden direkte Verfahren verstärkt auch für den Praxiseinsatz relevant. Sie erreichen jedoch nicht die gleich hohe Genauigkeit wie die indirekten Verfahren.

Um eine sehr hohe Genauigkeit zu erreichen, können direkte und indirekte Verfahren nacheinander ausgeführt werden. Hierbei wird das direkte Verfahren dazu verwendet, eine Startlösung für das indirekte Verfahren zu ermitteln. Das indirekte Verfahren wird anschließend dazu genutzt, um die gewünschte Genauigkeit der Lösung zu erhalten. Ein entscheidender Nachteil beider numerischer Verfahren ist die Tatsache, dass normalerweise auf bereits vorhandene, sehr effiziente Softwarepakete zurückgegriffen wird. Die Verwendung vorhandener Softwarepakete hat einen entscheidenden Nachteil: Sie benötigen Basis-Bibliotheken vorhandener Programmiersprachen. Diese stehen für die Serienentwicklung unter Umständen nicht zur Verfügung, da sie entweder die aktuellen Produktionsstandards nicht erfüllen oder die Steuergerätesoftware diese nicht unterstützt. Eine Neuimplementierung eines vorhandenen Softwarepaketes wiederum ist einerseits zu zeitaufwändig und zum anderen ist es sehr schwierig, die Effizienz bestehender Softwarepakete zu erreichen.

Eine von den bisherigen Betrachtungen abweichende Vorgehensweise zur Lösung eines Optimierungsproblems ist die dynamische Programmierung. Diese basiert auf dem Bellmanschen Optimalitätsprinzip. Dieses besagt, dass jedes Teilstück einer optimalen Lösung ebenfalls optimal ist. Zur Lösung des Optimierungsproblem wird der Zustandsraum diskretisiert und für jedes Teilstück die optimale Lösung gesucht. Aufgrund der hohen Stetigkeitsanforderungen der Trajektorie entsteht ein höherdimensionaler Zustandsraum, der zu sehr hohen Rechenzeiten führen kann. Ein Vorteil der dynamischen Programmierung ist jedoch die im Vergleich zu dem (in-)direkten Verfahren sehr einfache Implementierung.

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass ein hybrides Lösungsverfahren basierend auf den vorgestellten Methoden wünschenswert ist. Ein solches Verfahren sollte einerseits wie die dynamische Programmierung einfach zu implementieren und unabhängig von unterstützenden Softwarepaketen sein. Andererseits sollte die Dimension des Zustandsraums durch Zuhilfenahme der Variationsrechnung oder des Maximumprinzips reduziert werden.

3.2 Ableitung der Anforderungen an die Trajektorienplanung

Die Anforderungen an die Trajektorienplanung wurden ansatzweise schon in den Abschnitten 2.4.1 und 3.1 beschrieben und werden hier nochmals stichpunktartig zusammengefasst. Sie lassen sich in Anforderungen an die Trajektorie und Anforderungen an das Planungskonzept unterteilen. Die Anforderungen an die Trajektorie resultieren aus Komfort- und Sicherheitsaspekten. Die Anforderungen an das Planungskonzept hingegen entstehen primär durch die technischen Rahmenbedingungen.

Anforderungen an die Trajektorie

- **Sicherheitsabstand:** Die Trajektorie führt das eigene Fahrzeug sicher in den von der Fahrstrategie vorgegebenen Endzustand. Die Trajektorie muss somit sicherstellen, dass die vom Gesetzgeber vorgegebenen Sicherheitsabstände eingehalten werden. Dies impliziert, dass die Trajektorie kollisionsfrei ist.

- **Komfort:** Damit die Assistenzfunktion von den Kunden angenommen wird, müssen die Kunden die Trajektorie als angenehm bzw. komfortabel empfinden. Daraus entsteht die Notwendigkeit, ruckartige Bewegungen oder zu hohe Beschleunigungen zu vermeiden.
- **Systemdynamik:** Die Trajektorie muss die in Abschnitt 2.8.1 beschriebene Systemdynamik einhalten.
- **Aktordynamik:** Die Aktoren des Fahrzeugs unterliegen physikalischen Grenzen. So kann die gewünschte Stellgröße nur verzögert aufgebaut werden, und ihr Maximalwert ist beschränkt. Diese Limitierungen müssen in der Trajektorie abgebildet sein.
- **Vorausschauende Planung:** Die Trajektorie soll in der Lage sein, eine Querbewegung zu einem späteren Zeitpunkt als die Längsbewegung beginnen zu lassen. Dadurch kann das Fahrzeug gezielt eine Lücke anfahren, bevor es in diese wechselt. Dadurch wird die Anzahl der möglichen Fahrstreifenwechsel erhöht und eine frühzeitige Planung eines Fahrstreifenwechsels ermöglicht.

Anforderungen an das Planungskonzept

- **Vollständigkeit:** Das Planungskonzept muss in der Lage sein, Trajektorien für eine vollständige Autobahnfahrt bereitstellen zu können, d. h. Normalfahrt, Fahrstreifenwechsel, Auffahren und Abfahren.
- **Echtzeit:** Da sich das Fahrzeugumfeld sehr dynamisch ändern kann, ist es notwendig, die Trajektorie zyklisch neu zu planen. Aus diesem Grund ist ein Lösungsalgorithmus notwendig, der in Echtzeit berechnet werden kann.
- **Softwarepakete:** In der Serienfertigung ist die Verwendung von Softwarepaketen zur Lösung von Optimierungsproblemen stark eingeschränkt. Daher soll der Lösungsalgorithmus auf die Verwendung vorhandener Softwarepakete verzichten.

3.3 Detaillierte Beschreibung ausgewählter Ansätze

In Abschnitt 1.2.1 wurde bereits ein Überblick über den aktuellen Stand der Literatur gegeben. Zwei dieser Ansätze liefern einen Kerngedanken für das in dieser Arbeit verwendete Konzept. Diese beiden Ansätze werden hier detaillierter vorgestellt.

3.3.1 Ein-Segment-Rasterplanung

Bereits 1989 präsentierte Takahashi u. a. einen polynombasierten Ansatz für die Trajektorienplanung. Ziel ist es, eine Trajektorie zu generieren, deren Geschwindigkeit und Krümmung stetig verlaufen. Zusätzlich sollen ruckartige Beschleunigungen vermieden werden. Werling, Kammel

u. a. [2012] applizieren diese Methode auf das automatisierte Fahren auf der Straße. Zur Bestimmung der Trajektorie wird ein Punktmassenmodell ähnlich wie in Abschnitt 2.3.1 verwendet. Dieses wird um einen Zustand, die Beschleunigung, erweitert. In der Kostenfunktion wird neben den Endkosten auch der quadratische Stellaufwand, der Ruck, bestraft:

$$\min_{u(\cdot)} \quad J(u) = \rho(\chi(t_e), t_e) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_e} u^2(t) dt \quad (3.2a)$$

$$\text{u. B. v.} \quad \dot{\chi} = \tilde{f}(\chi, u), \quad \chi(t_0) = \chi_0. \quad (3.2b)$$

Das Optimierungsproblem wird mithilfe der Variationsrechnung analytisch gelöst. Als Lösung ergibt sich ein Polynom fünfter Ordnung. Dabei werden jeweils eine Trajektorie für die Längsbewegung und eine Trajektorie für die Querbewegung berechnet. Zur Lösung des Optimierungsproblems werden sowohl die Zielposition als auch die Manöverdauer benötigt. Diese sind beim automatisierten Fahren vorab allerdings nicht genau bekannt. Daher berechnen Werling, Kammel u. a. eine Trajektorienschar, indem sie die Manöverdauer und die Zielposition in Längs- und Querrichtung rastern. Anschließend wird die Trajektorie mit den geringsten Kosten ausgewählt, siehe Bild 3.1. Für die Rasterung der Zielzustände ist es notwendig, die Lösungsmenge zu dis-

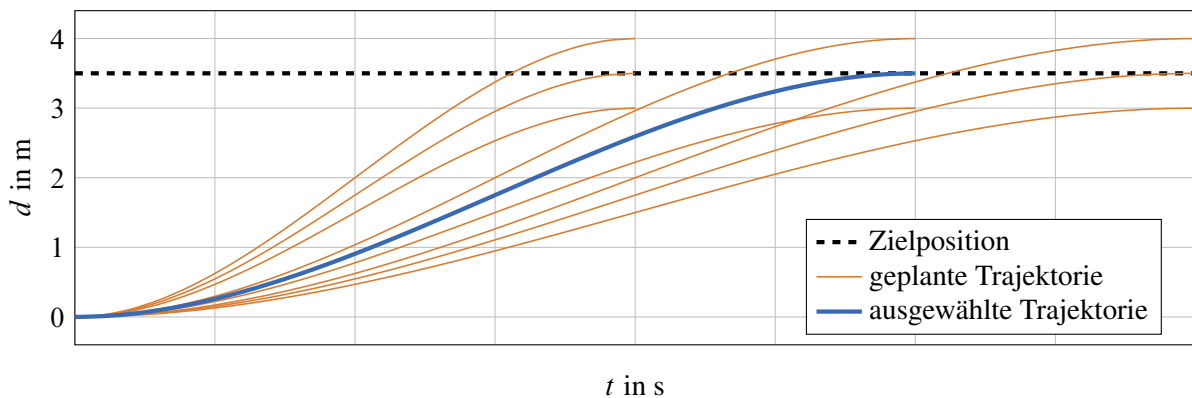


Bild 3.1: Geplante Trajektorienschar für die Querablage bei einem Fahrstreifenwechsel. Bild nach [Werling, Kammel u. a., 2012].

cretisieren. Hierdurch sind die erhaltenen Lösungen nur suboptimal. Dies stellt allerdings kein Problem dar. Einerseits ist die Kostenfunktion nur ein Hilfskonstrukt zur Bestimmung der Trajektorie und zum anderen ist die geringe Abweichung vom Optimum für die Fahrzeuginsassen nicht wahrnehmbar. Das Lösungsverfahren hat die in Abschnitt 3.1 beschriebene hybride Struktur. Für einen festen Zielwert und eine feste Manöverdauer kann die Lösung analytisch bestimmt werden. Da Zielwert und Manöverdauer nicht bekannt sind, muss für das Finden einer Lösung nur der Zielzustand und nicht der gesamte Zustandsraum diskretisiert werden. Die Implementierung des Lösungsalgorithmus ist einfach, und auch die benötigte Rechenzeit ist verhältnismäßig gering. Um Trajektorien für eine vollständige Autobahnfahrt zur Verfügung stellen zu können, werden drei Modi eingeführt: Tempomat, Folgefahrt und Ziellücke/-position anfahren [Werling, Ziegler u. a., 2010]. Alle Modi werden parallel geplant, und die Trajektorie mit den geringsten Kosten wird ausgewählt. Ein entscheidender Nachteil für Fahrstreifenwechselmanöver ist allerdings, dass der

Fahrstreifenwechsel immer zum aktuellen Zeitpunkt beginnt. Ein gezieltes Anfahren einer Lücke ist nicht möglich. Zusätzlich ist der Optimierungshorizont mit drei Sekunden sehr klein und ein vorausschauendes Fahren nur bedingt möglich.

3.3.2 Nichtlineare Drei-Segment-Planung

Hansen, Schulz u. a. [2016] stellen ein Konzept zur Trajektorienplanung vor, das sich speziell dem Fahrstreifenwechsel widmet. Dieses besteht aus drei Segmenten (siehe Bild 3.2):

Segment 1 Anfahren der Lücke

Segment 2 Durchführen der für den Fahrstreifenwechsel benötigten Querbewegung

Segment 3 Fortsetzung der Fahrt auf dem Zielfahrstreifen.

Das erste Segment kann wegfallen, falls ein Fahrstreifenwechsel direkt begonnen werden kann. In diesem Fall liefern die Drei-Segment-Planung und die Ein-Segment-Planung im Prinzip ähnliche Ergebnisse. Für die Berechnung der Längs- und Quertrajektorie im ersten und zweiten Segment wird jeweils ein Polynom fünften Grades verwendet. Im dritten Segment wird die Längsführung durch einen Abstandsregeltempomaten durchgeführt und die Quertrajektorie mit Hilfe eines Zustandsreglers berechnet. Bei der Lösung des Optimierungsproblems wird speziell darauf geachtet,

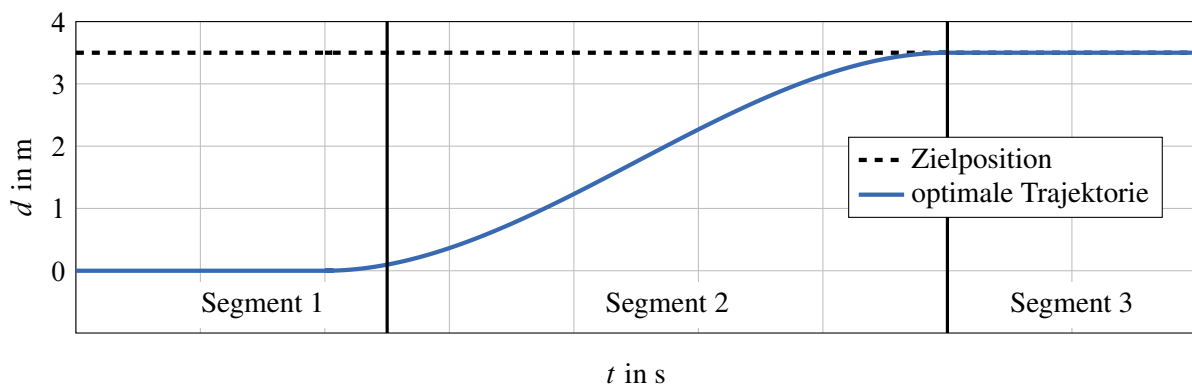


Bild 3.2: Verlauf der optimalen Querablage bei einem Fahrstreifenwechsel mit drei Segmenten. Bild nach [Hansen, Schulz u. a., 2016].

die Anzahl der Optimierungsvariablen gering zu halten. Dies wird durch eine spezielle Parametrierung erreicht. Die Bestimmung der optimalen Trajektorie reduziert sich somit auf das Finden einer passenden Parametrierung für die Polynome. Für die Lösung dieses statischen Optimierungsproblems wird auf ein Softwarepaket zurückgegriffen, das einen nichtlinearen Optimierungsalgorithmus (Downhill-Simplex) verwendet.

3.3.3 Analyse der ausgewählten Ansätze

Die ausgewählten Ansätze sind in Tabelle 3.1 gegenübergestellt. Es ist gut zu erkennen, dass die beiden vorgestellten Ansätze bereits einen Großteil der Anforderungen erfüllen. Jedoch weisen beide auch noch Schwachpunkte auf. So ist die Ein-Segment-Rasterplanung nicht in der Lage, einen frühzeitigen Fahrstreifenwechsel zu planen, und die nichtlineare Drei-Segment-Planung ist 'nur' für Fahrstreifenwechsel konzipiert. Eine Schwachstelle, die beide aufweisen, ist, dass ein Punktmassenmodell verwendet wird, das die Aktordynamik nicht vollständig berücksichtigt. Dadurch sind die sich ergebenden Trajektorien nicht ausreichend oft stetig differenzierbar. Um ein Konzept zu erstellen, das alle Anforderungen erfüllt, können beide Methoden kombiniert werden. Als Grundstruktur für das kombinierte Konzept wird die Ein-Segment-Rasterplanung verwendet und auf drei Segmente erweitert. Als Resultat erhält man eine Drei-Segment-Rasterplanung. Verwendet man wie in [Rathgeber u. a., 2016] vorgeschlagen, ein um die Aktordynamik erweitertes Punktmassenmodell, so erhält man schlussendlich ein Konzept, das alle Anforderungen an die Trajektorienplanung erfüllt, siehe Tabelle 3.1. Das Konzept der Drei-Segment-Rasterplanung wird im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt und im folgenden Abschnitt 3.4 im Detail vorgestellt.

	Ein-Segment-Rasterplanung	Nichtlineare Drei-Segment-Planung	Drei-Segment-Rasterplanung
Sicherheitsabstand	+	+	+
Komfort	+	+	+
Systemdynamik	+	+	+
Aktordynamik	–	–	+
vorausschauende Planung	–	+	+
Vollständigkeit	+	–	+
Echtzeit	+	+	+
Softwarepakete	+	–	+

Tabelle 3.1: Gegenüberstellung der ausgewählten Ansätze aus der Literatur und des eigenen Ansatzes bzgl. der Anforderungen an die Trajektorienplanung aus Abschnitt 3.2.

3.4 Drei-Segment-Rasterplanung

Die Drei-Segment-Rasterplanung ist wie in Abschnitt 3.3.3 beschrieben eine Kombination der beiden detaillierter vorgestellten Ansätze aus der Literatur. Die Kombination der beiden Ansätze

ze dient jedoch nur als Grundgerüst der Drei-Segment-Rasterplanung. Die vorherigen Ansätze werden nicht nur kombiniert, sondern auch noch an verschiedenen Stellen entscheidend weiterentwickelt. So wird zum Beispiel in Längsrichtung keine Position, sondern eine Geschwindigkeit geplant und durch eine geschickte Formulierung der Kostenfunktion so ergänzt, dass die Anzahl der Längsmodi auf einen reduziert werden kann. Zusätzlich werden zwei in der Literatur noch offene Fragestellungen betrachtet. Die erste ist die Erstellung eines Konzepts für das Abbrechen eines Fahrstreifenwechsels und die zweite ist ein Vergleich verschiedener Modelle zur Prädiktion des rückwärtigen Fahrzeugs auf dem Zielfahrstreifen während eines Fahrstreifenwechsels. Hierbei werden speziell Modelle betrachtet, die eine Reaktion auf ein einscherendes Vorderfahrzeug ermöglichen. Zu Beginn des Abschnittes wird zunächst eine allgemeine Übersicht über die Struktur des Trajektorienplaners gegeben. Daraufhin wird das allgemeine Lösungsverfahren zur Berechnung der Trajektorien vorgestellt und beschrieben, wie damit Längs- und Quertrajektorien berechnet werden. Aufbauend auf dieser Grundlage wird anschließend die Erweiterung auf die drei Segmente dargelegt, gefolgt von der Auswahl und dem Vergleich der Prädiktionsmodelle und dem Konzept zum Fahrstreifenwechselabbruch.

3.4.1 Struktur des Trajektorienplaners

Der Trajektorienplaner besteht aus zwei Planungsmodulen: dem Basis-Planer und dem Stillstands-Planer, siehe Bild 3.3. Der Basis-Planer ist für die Normalfahrt zuständig, d. h. Halten des Fahrstreifens, Fahrstreifenwechsel, etc. Der Stillstands-Planer hingegen plant permanent eine Trajektorie mit maximaler Verzögerung in den Stillstand. Ein Abbremsen in den Stillstand ist z. B. notwendig, wenn eine Auffahrt auf die Autobahn nicht möglich ist und am Ende des Fahrstreifens gestoppt werden muss. Das Abbremsen in den Stillstand soll zu dem spätestmöglichen Zeitpunkt erfolgen, weshalb die maximale Verzögerung verwendet wird, die dem Assistenzsystem zur Verfügung steht. Diese ist mit 3 m/s^2 bei dem verwendeten Versuchsfahrzeug deutlich kleiner als die maximal physikalisch mögliche Verzögerung bei trockener Straße. Somit ist das Bremsen in den Stillstand kein Notbremsmanöver, sondern immer noch verhältnismäßig komfortabel.

Der Stillstands-Planer wird in einem separaten Block berechnet, damit zwischen Basis-Planer und Stillstands-Planer gewechselt werden kann. Das Wechseln zwischen Basis-Planer und Stillstands-Planer erfolgt durch eine konservative Umschaltstrategie. Sobald der Stillstands-Planer aktiviert ist, bleibt dieser aktiv, bis das Fahrzeug vollständig in den Stillstand gebremst hat. Diese konservative Strategie ist notwendig, da der Trajektorienplaner keine detaillierte Situationsanalyse durchführt und somit nicht bewertet, wann ein Zurückschalten auf den Basis-Planer sinnvoll ist. So könnte z. B. ein kurzzeitiger Messfehler dazu führen, dass während einer Stillstandsbremsung bei einem Auffahrmanöver kurzzeitig eine kollisionsfreie Wechsellücke gefunden wird. Wechselt der Trajektorienplaner in diesem Fall auf den Basis-Planer zurück, entsteht eine Situation, in der keine gültige Trajektorie mehr gefunden werden kann.

=Der Trajektorienplaner hat vier Eingangsgrößen. Die beiden hellgrau dargestellten Größen, Fahrstreifen und Fahrzeugzustände, dienen lediglich der einmaligen Initialisierung des Trajektorienplaners, wenn dieser aktiviert wird. Den Manöverwunsch erhält der Trajektorienplaner von der

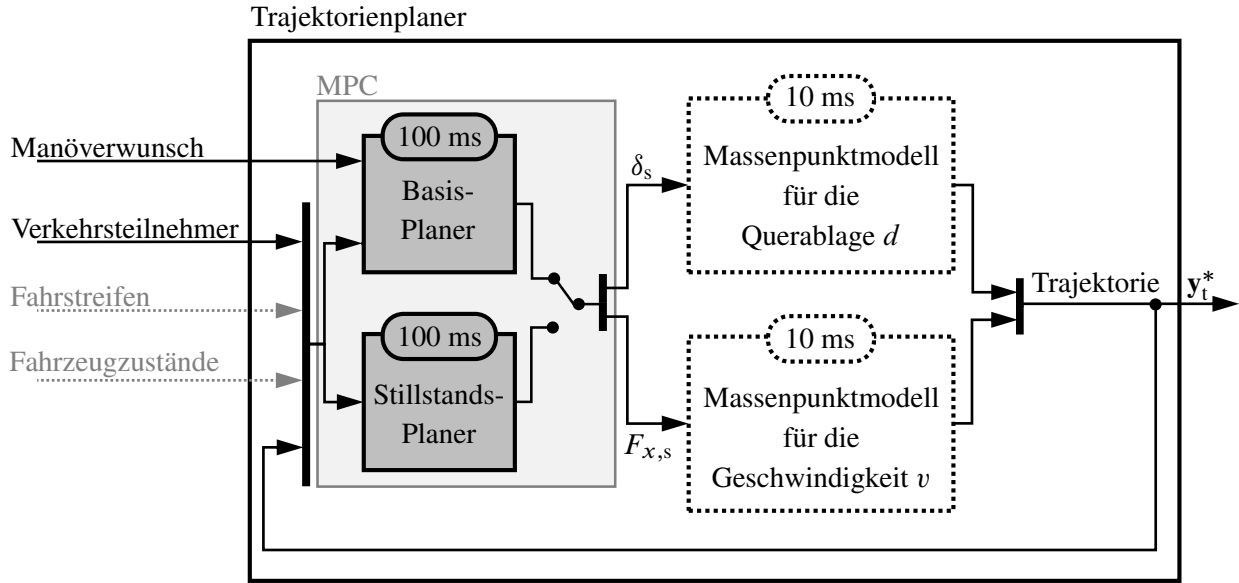


Bild 3.3: Struktur des Trajektorienplaners dargestellt als in sich geschlossener MPC

Fahrstrategie. Der Trajektorienplaner berechnet für das gewünschte Manöver passende Trajektorien. Kann eine kollisionsfreie Trajektorie gefunden werden, wird diese ausgeführt. Ansonsten verbleibt der Trajektorienplaner im aktuellen Manöver, das im Normalfall das Halten des aktuellen Fahrstreifens ist. Die Informationen über die anderen Verkehrsteilnehmer bestehen aus den aktuellen Messwerten für den relativen Abstand, der absoluten Geschwindigkeit sowie der absoluten Beschleunigung. Außerdem wird zu Beginn eines Fahrstreifenwechsels einmalig aus den Initialisierungsgrößen die aktuelle Fahrstreifenbreite sowohl des Start- als auch des Zielfahrstreifens entnommen. Die einzige Ausgangsgröße des Trajektorienplaners ist die Trajektorie:

$$\mathbf{y}_t^* = \left[v^*, \dot{v}^*, \ddot{v}^*, \ddot{v}^*, d^*, \dot{d}^*, \ddot{d}^*, \ddot{d}^*, d^{(4)*} \right]. \quad (3.3)$$

Diese enthält den Sollverlauf für die Fahrzeuggeschwindigkeit und ihre ersten drei Ableitungen sowie den Sollverlauf für die Querablage und ihre ersten vier Ableitungen. Im nachfolgenden Teil dieser Arbeit werden Variablen, die nur von Elementen der Trajektorie (3.3) abhängen, mit einem Stern '*' gekennzeichnet.

Der Startwert, der für die Trajektorienplanung verwendet wird, ist immer der Sollzustand der vorherigen Planung (siehe Abschnitt 2.1). Somit kann die Trajektorienplanung als eine in sich geschlossene MPC-Regelung betrachtet werden [Hansen, 2018], siehe Bild 3.3. Die Massenpunktmodelle haben hierbei die gleiche Zykluszeit von 10 ms wie die unterlagerte Fahrzeugführung. Dies ist notwendig, damit der Fahrzeugführung für jeden Zyklus ein aktueller Trajektorienpunkt zur Verfügung steht.

3.4.2 Beschreibung des Umfelds

Für das Planen einer Trajektorie kann das Umfeld stets auf maximal vier Fahrzeuge reduziert werden, siehe Bild 3.4. Für diese vier Fahrzeuge werden folgende Begriffe eingeführt:

- **HS** – Heckfahrzeug Startfahrsstreifen
- **FS** – Frontfahrzeug Startfahrsstreifen
- **HZ** – Heckfahrzeug Zielfahrsstreifen
- **FZ** – Frontfahrzeug Zielfahrsstreifen.

Ist eines der vier Fahrzeuge nicht vorhanden, wird es bei der Planung durch ein virtuelles Fahrzeug in unendlicher Entfernung ersetzt. Das Fahrzeug, das die Trajektorienplanung durchführt, wird als

- **E** – Ego Fahrzeug

bezeichnet. Führt das Ego-Fahrzeug einen Fahrsstreifenwechsel aus, beginnt dieser auf dem Startfahrsstreifen und endet auf dem Zielfahrsstreifen. Ein Fahrsstreifenwechsel wird immer in eine auf dem Zielfahrsstreifen befindliche Lücke durchgeführt.

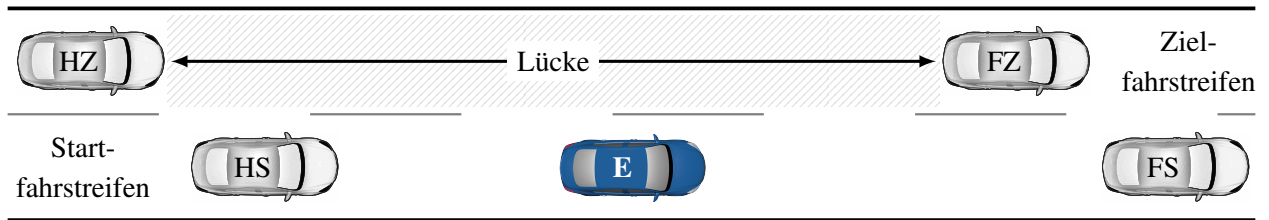


Bild 3.4: Begriffsdefinitionen des reduzierten Umfeldes der Trajektorienplanung

3.4.3 Lösungsverfahren der Rasterplanung – Allgemeiner Fall

Zur Bestimmung der optimalen Trajektorie wird das in 2.8.1 beschriebene vollständige Punktmassenmodell verwendet. Dieses enthält eine vereinfachte Aktordynamik und sorgt somit dafür, dass die Trajektorien ausreichend oft stetig differenzierbar sind. Zur Bestimmung der Trajektorie wird zunächst ein unbeschränktes Optimalsteuerungsproblem aufgestellt:

$$\min_{u(\cdot)} \quad J_{\chi}(u) = k_t t_e + k_{\chi} (\chi_1(t_e) - \chi_{1,\text{Ziel}})^2 + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_e} u^2(t) dt, \quad t_e > t_0 \geq 0 \quad (3.4a)$$

$$\text{u. B. v.} \quad \dot{\chi} = \tilde{f}(\chi, u), \quad \chi(t_0) = \chi_0 \quad (3.4b)$$

$$\chi_2(t_e) = \chi_{2,e}, \quad \chi_3(t_e) = \chi_{3,e}, \quad \chi_4(t_e) = \chi_{4,e}. \quad (3.4c)$$

hierbei beschreibt $\chi_{1,\text{Ziel}}$ die gewünschte Zielgröße, die am Ende der Trajektorie erreicht werden soll und t_e die Manöverlänge. Die Gewichtungsfaktoren der Endkosten sind k_t und k_χ . Werden zusätzlich alle Ableitungen $\chi_{2,e}$, $\chi_{3,e}$ und $\chi_{4,e}$ zu Null gesetzt, befindet sich das Fahrzeug am Ende der Trajektorie in einem stationären Zustand. Das Optimalsteuerungsproblem kann unter Verwendung der Hamilton-Funktion und den Optimalitätsbedingungen erster Ordnung gelöst werden (s. [Rathgeber u. a., 2016] und Anhang A.2). Für die optimale Steuerung u^* ergibt sich ein Polynom dritter Ordnung und mit Hilfe der Systemdynamik (2.19) erhält man für den Verlauf der Zielgröße ein Polynom siebter Ordnung. Die Polynomkoeffizienten können mit folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$\chi(t) = \begin{bmatrix} c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4 + c_5 t^5 + c_6 t^6 + c_7 t^7 \\ c_1 + 2c_2 t + 3c_3 t^2 + 4c_4 t^3 + 5c_5 t^4 + 6c_6 t^5 + 7c_7 t^6 \\ 2c_2 + 6c_3 t + 12c_4 t^2 + 20c_5 t^3 + 30c_6 t^4 + 42c_7 t^5 \\ 6c_3 + 24c_4 t + 60c_5 t^2 + 120c_6 t^3 + 210c_7 t^4 \end{bmatrix} \quad (3.5a)$$

$\underbrace{\hspace{15em}}_{\mathbf{M}_1(t)\mathbf{c}_{0123}} \qquad \underbrace{\hspace{15em}}_{\mathbf{M}_2(t)\mathbf{c}_{4567}}$

$$\mathbf{c}_{0123} = \mathbf{M}_1^{-1}(0)\chi(0) \quad (3.5b)$$

$$\mathbf{c}_{4567} = \mathbf{M}_2^{-1}(t_e)(\chi(t_e) - \mathbf{M}_1(t_e)\mathbf{c}_{0123}) \quad (3.5c)$$

Die Vektoren $\mathbf{c}_{0123} = [c_0 \dots c_3]'$ und $\mathbf{c}_{4567} = [c_4 \dots c_7]'$ enthalten dabei die Polynomkoeffizienten. Zu deren Bestimmung wird die optimale Endzeit t_e sowie die in $\chi(t_e)$ enthaltene optimale Endposition $\chi_{e,1}$ benötigt. Hierfür wird zuerst der zweidimensionale Lösungsraum diskretisiert und anschließend für jedes Wertepaar $(\chi_{e,1} | t_e)$ des diskretisierten Lösungsraums eine Steuertrajektorie berechnet. Es entsteht eine wie in Bild 3.1 dargestellte Trajektorienschar. Die Steuertrajektorien überführen das System in den gewünschten Endzustand für den unbeschränkten Fall, d. h. Kollisionsfreiheit und Stellgrößenbegrenzungen werden nicht berücksichtigt. Deshalb wird die Trajektorienschar zunächst auf jene Trajektorien reduziert, die kollisionsfrei sind und die Stellgrößenbegrenzungen nicht verletzen. Anschließend wird aus dieser reduzierten Menge anhand von (3.4a) die Trajektorie mit den geringsten Kosten ausgewählt.

Der Trajektorienplaner wird mit einer Zykluszeit von $T_{\text{Zykl}} = 100$ ms aufgerufen. Als Startwert für die aktuelle Planung wird der Endwert der vorherigen Planung verwendet (vgl. Abschnitt 2.1). Der Übergang zwischen der aktuell berechneten und der im vorherigen Zyklus berechneten Trajektorie soll nahtlos erfolgen. Es wird daher gefordert, dass der Anfangszustand der aktuell geplanten Trajektorie χ_{neu} dem zum Zeitpunkt $t_0 + T_{\text{Zykl}}$ ausgewerteten Zustand χ_{alt} der vorherigen Trajektorie entspricht:

$$\chi_{\text{neu}}(t_0) = \chi_{\text{alt}}(t_0 + T_{\text{Zykl}}). \quad (3.6)$$

Die präsentierte Rasterplanung wird im Folgenden zur Berechnung einer kombinierten Längs- und Quertrajektorie verwendet. Die Berechnung erfolgt anhand eines sequentiellen Ablaufs. Dieser ist in Bild 3.5 dargestellt. Zuerst wird eine Längstrajektorienschar berechnet. Diese wird auf jene Trajektorien reduziert, die die Stellgrößenbegrenzungen nicht überschreiten. Zusätzlich muss

bei der Berechnung der Längstrajektorien überprüft werden, dass diese eine maximale Geschwindigkeit nicht überschreiten. Für jede Längstrajektorie, die diese Kriterien erfüllt, wird eine Schar an Quertrajektorien berechnet. Als Resultat erhält man eine Schar aus kombinierten Längs- und Quertrajektorien. Diese werden zuerst auf die Einhaltung der Beschleunigungsgrenzen hin überprüft. Abschließend werden alle Trajektorien noch auf Kollisionsfreiheit überprüft. Die beste Trajektorie wird schließlich aus der Menge der kollisionsfreien Trajektorien mit einer Gütefunktion ausgewählt. Die einzelnen Blöcke des sequentiellen Ablaufs werden im Folgenden detailliert beschrieben.

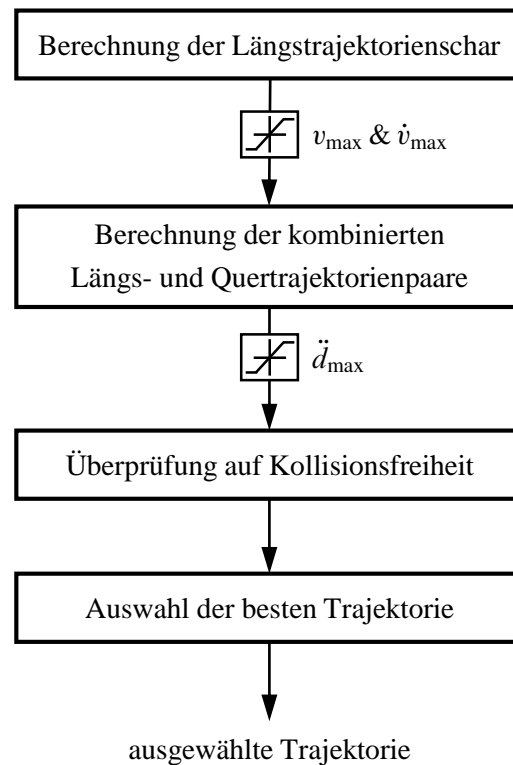


Bild 3.5: Sequentieller Ablauf der Trajektorienplanung

3.4.4 Berechnung der Längstrajektorie

Bei der Berechnung der Längsbewegung können grundsätzlich zwei Anwendungsfälle unterschieden werden. Bei einer Folgefahrt ist das Ziel, einem vorausfahrenden Fahrzeug in einem gewünschten Abstand zu folgen. Bei einer Freifahrt hingegen soll mit einer bestimmten Wunschgeschwindigkeit gefahren werden. Werling, Ziegler u. a. [2010] haben hierzu zwei Modi eingeführt. Einen Modus für eine Folgefahrt, bei dem ein Zielabstand geplant wird, und einen für die Freifahrt, bei dem eine Zielgeschwindigkeit geplant wird. Der Nachteil der Verwendung zweier Modi ist, dass diese beiden Modi parallel berechnet werden müssen und zwischen ihnen umgeschaltet werden muss. Die Anzahl der Modi wird in dieser Arbeit durch eine Anpassung der von Werling, Ziegler u. a. [2010] verwendeten Gütefunktion auf einen Modus reduziert. Grundsätzlich kann entweder eine absolute Größe, z. B. die Fahrzeugposition, oder eine relative Größe, z. B.

der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug, geplant werden. Wird eine relative Größe geplant, wird die unterlagerte Regelung diese exakt einstellen. Die Einregelung einer relativen Größe hat jedoch den Nachteil, dass diese maßgeblich von der Bewegung des Vordermanns abhängt. Hierdurch werden auch sehr geringe unerwartete Bewegungen des vorausfahrenden Fahrzeugs direkt an das Ego-Fahrzeug übertragen. Es entstehen sehr viele Korrekturingriffe durch die unterlagerte Fahrzeugführung. Wird hingegen eine absolute Größe geplant, hängt diese nur von der eigenen Fahrzeugbewegung ab, und die unterlagerte Regelung muss keine unerwarteten Korrekturen vornehmen. Da die absolute Fahrzeugposition im Fahrzeug nicht gemessen werden kann, wird in dieser Arbeit eine absolute Fahrzeuggeschwindigkeit geplant. Die Fahrzeuggeschwindigkeit ist zusätzlich im Gegensatz zur Fahrzeugposition die anschaulichere Größe. Durch die Wahl einer absoluten Größe, erfolgt die Einregelung des gewünschten Abstands auf das vorausfahrende Fahrzeug ausschließlich auf der Planungsebene. Der Trajektorienplaner stellt aus diesem Grund eine Modellprädiktive Regelung dar. Die Korrektur auf Planungsebene ist für eine geringe Abweichung des Wunschabstands sehr sanft und für Fahrzeuginsassen nicht wahrnehmbar.

Zur Beschreibung der Längsbewegung wird auf das in Abschnitt 2.8.1 eingeführte vollständige Punktmassenmodell (2.19) zurückgegriffen. Aufgrund der Tatsache, dass nur eine vereinfachte Aktordynamik in das vollständige Punktmassenmodell eingebaut ist, können die Zustände der Aktordynamik auch als Produkt der Fahrzeugmasse und der höheren Ableitungen der Fahrzeuggeschwindigkeit interpretiert werden. In Längsrichtung wird kein Abstand, sondern eine Geschwindigkeit geplant. Somit entfällt die Gleichung zur Beschreibung der Position, weshalb das Modell im Unterschied zu (2.19) nur drei Zustände hat:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{F}_x \\ \ddot{F}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ m\ddot{v} \\ m\ddot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ F_x \\ \dot{F}_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} F_{x,s}. \quad (3.7)$$

Durch das Planen einer Zielgeschwindigkeit ändern sich auch die Endkosten von (3.4a) und man erhält zum Berechnen der Trajektorienschar folgende Kostenfunktion:

$$J_v(F_{x,s}) = k_{t_{e,v}} t_{e,v} + k_v (v(t_{e,v}) - v_{\text{Ziel}}(t_{e,v}))^2 + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_{e,v}} F_{x,s}^2(t) dt. \quad (3.8)$$

Mit $k_{t_{e,v}}$ und k_v werden die Endkosten gewichtet und $t_{e,v}$ ist die Manöverlänge. Aufgrund der Reduktion des Punktmassenmodells auf drei Zustände ergeben sich als Lösung der Kostenfunktion Polynome fünfter Ordnung anstelle von Polynomen siebter Ordnung. Die Herleitung hierfür erfolgt analog zu Abschnitt 3.4.3. Der diskretisierte Lösungsraum für die Endgeschwindigkeit v_e besteht aus der maximalen Geschwindigkeit v_{\max} und aus einer Umgebung um die Endgeschwindigkeit des entsprechenden Frontfahrzeugs $v_{F,e}$:

$$v_e \in \{v_{\max}, v_{F,e,\min}, \dots, v_{F,e}, \dots, v_{F,e,\max}\}. \quad (3.9)$$

Die maximale Geschwindigkeit ist hierbei das Minimum der vom Fahrer gewünschten und der gesetzlich erlaubten Höchstgeschwindigkeit des befahrenen Straßenabschnitts. Als Zielgeschwin-

digkeit wird die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs gewählt:

$$v_{\text{Ziel}}(t_{e,v}) = v_{F,e}. \quad (3.10)$$

Um die Anzahl der zu berechnenden Trajektorien gering zu halten, muss eine geeignete Manöverlänge $t_{e,v,\text{Ziel}}$ für jede Zielgeschwindigkeit vorab bestimmt werden. Dies geschieht anhand einer einfachen Vorplanung. Hierfür wird die Bewegung des Ego-Fahrzeugs mit einer konstanten Beschleunigung \dot{v}_{konst} um einen Zeithorizont $t_{e,v,\text{Ziel}}$ prädictiert. Der Zeithorizont berechnet sich hierbei zu

$$t_{e,v,\text{Ziel}} = \frac{v_{\text{Ziel}} - v_0}{\dot{v}_{\text{konst}}}, \quad (3.11)$$

wobei v_0 die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs zu Beginn der Planung ist. Eine sinnvolle Größe für die konstante Beschleunigung hängt maßgeblich von der jeweiligen Situation ab, in der sich das Ego-Fahrzeug zu Beginn der Planung befindet. Aus diesem Grund wird diese Berechnung für mehrere Beschleunigungen durchgeführt, d. h.

$$\dot{v}_{\text{konst}} \in \begin{cases} \{0, \dots, \dot{v}_{\text{max}}\} \setminus \{0\}, & v_{\text{Ziel}} - v_0 > 0 \\ \{\dot{v}_{\text{min}}, \dots, 0\} \setminus \{0\}, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (3.12)$$

Für jede Beschleunigung wird überprüft, ob das Ego-Fahrzeug einen noch zu spezifizierenden Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einhält. Aus allen Trajektorien, die dieses Kriterium erfüllen, wird anhand folgender Kostenfunktion die optimale Manöverlänge $t_{e,v,\text{Ziel,opt}}$ ausgewählt:

$$J_{t_{e,v,\text{Ziel}}} = k_{t_{e,v,\text{Ziel}}} t_{e,v,\text{Ziel}} + k_{\dot{v}_{\text{konst}}} \dot{v}_{\text{konst}}. \quad (3.13)$$

Je größer der Gewichtungsfaktor $k_{t_{e,v,\text{Ziel}}}$ gegenüber dem Gewichtungsfaktor $k_{\dot{v}_{\text{konst}}}$ ist, desto aggressiver ist das Fahrverhalten. Die diskretisierte Lösungsmenge für die Manöverdauer ergibt sich abschließend zu:

$$t_{e,v} \in \{t_{e,v,\text{min}}, \dots, t_{e,v,\text{Ziel,opt}}, \dots, t_{e,v,\text{max}}\}. \quad (3.14)$$

Um die benötigte Trajektorienschar zu erhalten, wird für jedes Wertepaar $(v_e | t_{e,v})$ eine Trajektorie berechnet. Zur Bewertung der einzelnen Trajektorien innerhalb der Trajektorienschar wird die Kostenfunktion (3.8) nun um einen Kostenterm zur Bewertung des Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug erweitert:

$$J_{v,a}(F_{x,s}) = J_v(F_{x,s}) + k_a (l_a(t_{e,v}) - l_{a,\text{Ziel}}(t_{e,v}))^2. \quad (3.15)$$

Der zusätzliche Kostenterm stellt sicher, dass dem vorausfahrenden Fahrzeug im gewünschten Sicherheitsabstand gefolgt wird. Die Kosten der Abweichung des Zielabstand $l_{a,\text{Ziel}}$ vom Endabstand l_a zum vorausfahrenden Fahrzeug werden dabei mit k_a gewichtet. Den Endabstand erhält man durch Integration der jeweiligen Geschwindigkeitstrajektorie. Der Zielabstand bzw. ein Sicherheitsabstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug ist in der Straßenverkehrsordnung nicht exakt festgelegt [StVO]. Üblicherweise wird auf deutschen Autobahnen ein zeitlicher Sicherheitsabstand von $T_{a,\text{Soll}} = 1,8 \text{ s}$ empfohlen. Dies entspricht dem halben Tachowert. Multipliziert man diesen Abstand mit der Fahrzeuggeschwindigkeit und ergänzt das entstehende Produkt um einen konstanten Abstand $l_{a,\text{konst.}}$, so erhält man den räumlichen Zielabstand:

$$l_{a,\text{Ziel}}(t) = T_{a,\text{Soll}} v(t) + l_{a,\text{konst.}}. \quad (3.16)$$

Der konstante Wert wird benötigt, um beim Bremsen in den Stillstand einen minimalen Sicherheitsabstand einzuhalten, da der zeitliche Abstand in diesem Fall zu Null wird. Muss eine große Geschwindigkeitsdifferenz ausgeglichen werden, ist es sinnvoll, die maximale Beschleunigung/Verzögerung über einen längeren Zeitraum zu halten (vereinfachend wird im Folgenden nur von Beschleunigung gesprochen). Polynome können die maximale Beschleunigung jedoch nur in einem Punkt erreichen. Es wird dadurch viel Zeit für den Beschleunigungsvorgang benötigt. Um dies zu vermeiden wird ein dreistufiger Beschleunigungsvorgang auf Basis von Rathgeber [2016] verwendet. Analog zu (3.4a) wird ein Optimierungsproblem zum Erreichen einer Sollbeschleunigung aufgestellt. Als Lösung erhält man für den Beschleunigungsverlauf ein Polynom dritter Ordnung. Die drei Stufen haben folgende Funktion:

- **Stufe 1**
Aufbau der maximalen Beschleunigung
- **Stufe 2**
Halten der maximalen Beschleunigung
- **Stufe 3**
Abbau der Beschleunigung und gleichzeitiges Einstellen einer Wunschgeschwindigkeit.

Da in Stufe 3 zusätzlich zum Abbau der Beschleunigung eine Wunschgeschwindigkeit vorgegeben werden soll, wird ein zusätzlicher Freiheitsgrad benötigt. Aus diesem Grund wird in Stufe 3 anstelle eines Polynom 3. Grades ein Polynom 5. Grades verwendet. Ein beispielhafter Verlauf ist in Bild 3.6 dargestellt. Der zeitliche Vorteil des dreistufigen Vorgangs hängt maßgeblich davon ab, wie schnell die Beschleunigung in Stufe 1 auf- bzw. in Stufe 3 abgebaut wird.

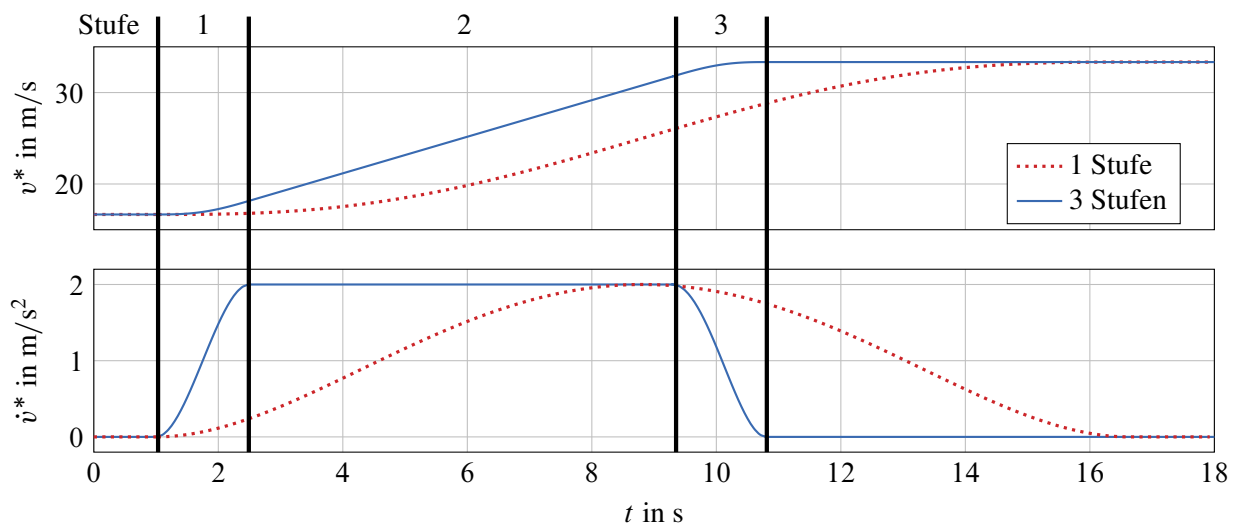


Bild 3.6: Vergleich des dreistufigen Beschleunigungsvorgangs mit dem einstufigen bei einem Auf- fahrtmanöver auf die Autobahn mit einer maximalen Beschleunigung von 2 m/s^2

3.4.5 Berechnung der Quertrajektorie

Für jede Längstrajektorie, die die Beschleunigungsgrenzen einhält und die maximale Geschwindigkeit nicht überschreitet, wird nun eine Quertrajektorie geplant. Hierdurch entsteht eine Schar an kombinierten Längs- und Quertrajektorienpaaren. Für die Berechnungen der Quertrajektorien wird das vollständige Punktmassenmodell (2.19) auf die Beschreibung der Querdynamik angewandt und man erhält:

$$\begin{bmatrix} \dot{d} \\ \ddot{d} \\ \dot{\delta} \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{d} \\ \ddot{d} \\ \dot{\delta} \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix}^{(4)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ \dot{d} \\ \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \delta_s. \quad (3.17)$$

Es wird hier vereinfachend angenommen, dass der Lenkwinkel direkt auf die Querbeschleunigung wirkt. Die höheren Ableitungen der Querablage stimmen dadurch mit den Zuständen der Aktordynamik überein. Die Schar der Quertrajektorien wird mit Hilfe von (3.4a) berechnet, die für die Querbewegung folgende Form annimmt:

$$J_d(\delta_s) = k_{t_{e,d}} t_{e,d} + k_d (d(t_{e,d}) - d_{\text{Ziel}})^2 + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_{e,d}} \delta_s^2(t) dt. \quad (3.18)$$

Hierbei sind $k_{t_{e,d}}$ und k_d die Gewichtungsfaktoren und $t_{e,d}$ die Manöverdauer. In Werling, Kammer u. a. [2012] wird ein verhältnismäßig kleiner Optimierungshorizont verwendet. Somit kann ein Fahrstreifenwechsel oftmals nicht vollständig innerhalb eines Planungshorizonts durchgeführt werden. Eine Rasterung der Querablage d ist deshalb zwingend erforderlich. Wird der Planungshorizont genügend groß gewählt, kann die Zielquerablage innerhalb eines Planungshorizonts erreicht werden. Dadurch kann auf eine Rasterung der Querablage verzichtet werden und der Lösungsraum verkleinert sich um eine Dimension. Ebenso vereinfacht sich die Kostenfunktion (3.18) zu:

$$J_d(\delta_s) = k_{t_{e,d}} t_{e,d} + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_{e,d}} \delta_s^2(t) dt. \quad (3.19)$$

Die Kostenfunktion enthält damit nur noch einen Parameter, mit dem die Länge und somit auch die Dynamik des Fahrstreifenwechsels eingestellt wird. Um den diskretisierten Lösungsraum klein zu halten, wird zu Beginn eines neuen Manövers in Querrichtung die benötigte Manöverdauer $t_{e,d,\text{Ziel}}$ unter der Annahme einer konstanten Beschleunigung bestimmt:

$$d_{\text{Ziel}} = d_0 + \dot{d}_0 t_{e,d,\text{Ziel}} + \frac{1}{2} \ddot{d}_{\text{konst}} t_{e,d,\text{Ziel}}^2 \quad (3.20)$$

$$t_{e,d,\text{Ziel}} = \frac{-\dot{d}_0 + \sqrt{\dot{d}_0^2 + 2(d_{\text{Ziel}} - d_0) \ddot{d}_{\text{konst}}}}{\ddot{d}_{\text{konst}}}. \quad (3.21)$$

Hierbei sind d_0 und \dot{d}_0 die aktuelle Querablage des Ego-Fahrzeugs und ihre erste Ableitung zu Beginn des Planungszyklus sowie \ddot{d}_{konst} eine angenehm empfundene mittlere Querbeschleunigung. Für den Lösungsraum ergibt sich folgende Form:

$$t_{e,d} \in T_{e,d,1} = \{t_{e,d,\min,1}, \dots, t_{e,d,\text{Ziel}}, \dots, t_{e,d,\max,1}\}. \quad (3.22)$$

Nach Beginn eines Quermanövers orientiert sich der Lösungsraum an der optimalen Endzeit der vorherigen Planung $t_{e,d,\text{alt}}$. Diese Endzeit wird zunächst um die Zykluszeit verkürzt

$$t_{e,d,\text{neu}} = t_{e,d,\text{alt}} - T_{\text{Zykl}}. \quad (3.23)$$

Anschließend wird der Lösungsraum als eine kleine Umgebung um die verkürzte vorherige optimale Endzeit gewählt:

$$t_{e,d} \in T_{e,d,2} = \{t_{e,d,\min,2}, \dots, t_{e,d,\text{neu}}, \dots, t_{e,d,\max,2}\}. \quad (3.24)$$

Bei der Überprüfung der Beschleunigungsgrenzen der Trajektorienschar wird sinnvollerweise nicht die Beschleunigung der Querablage \ddot{d} , sondern die gesamte Querbeschleunigung des Fahrzeugs a_y überprüft. Es wird vereinfachend angenommen, dass die Beschleunigung der Querablage immer in Richtung der y_F -Achse des Fahrzeugkoordinatensystems zeigt. Die gesamte Querbeschleunigung des Fahrzeugs ergibt sich dann aus der Summe von Zentripetalbeschleunigung und Beschleunigung der Querablage zu

$$a_y^F(t) = v^2(t)\kappa(t) + \ddot{d}(t) \quad (3.25)$$

mit der aktuellen Bahnkrümmung $\kappa(t)$. Dem Trajektorienplaner steht z. B. beim Befahren einer Linkskurve und gleichzeitigem Durchführen eines Fahrstreifenwechsels nach links nur eine reduzierte maximale Beschleunigung für die Planung zur Verfügung. Die Fahrzeugsensorik kann den benötigten Krümmungsverlauf nicht über den vollen Optimierungshorizont erfassen. Da sich die Krümmung auf einer Autobahn nur sehr langsam ändert, wird diese innerhalb eines Planungszyklus als konstant angenommen. Für zukünftige Systeme, die über eine exakte Lokalisierung (siehe z. B. [Harr, 2019]) und eine hoch aufgelöste Karte verfügen, kann der Krümmungsverlauf direkt aus der Karte entnommen werden.

3.4.6 Kollisionsvermeidung

Alle Längs- und Quertrajektorienpaare, die die maximale Querbeschleunigung nicht überschreiten, werden auf Kollision überprüft. Für die Kollisionsprüfung werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen (vgl. Bild 3.7):

- Alle Fahrzeuge sind zu jeder Zeit tangential zur Fahrbahn orientiert, d. h. $\psi_t = 0$.
- Ein Fahrzeug belegt stets die volle Breite eines Fahrstreifens.
- Befindet sich ein Fahrzeug zwischen zwei Fahrstreifen, so belegt es beide.

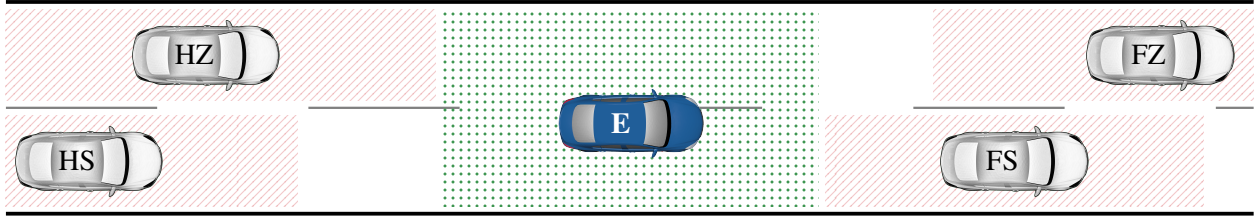


Bild 3.7: Darstellung der Bereiche zur Berechnung der Kollisionsvermeidung während eines Fahrstreifenwechsels des Ego-Fahrzeugs: Nicht befahrbare Bereiche (rot schraffiert) und befahrbarer Bereich (grün gepunktet).

Zur Kollisionsvermeidung ist es daher ausreichend einen Sicherheitsabstand entlang der x_S -Achse des Straßenkoordinatensystems zu überwachen. Hierfür wird um jedes Fahrzeug ein von der Geschwindigkeit abhängiger Bereich festgelegt, der nicht befahren werden darf. Zur Kollisionsvermeidung wird die Trajektorie zeitlich abgetastet und an jedem Abtastpunkt wird überprüft, ob die geplante Trajektorie in einen der relevanten Sicherheitsbereiche eindringt.

Bei einem Fahrstreifenwechsel nach links tritt häufig der Fall ein, dass man von einem Fahrzeug überholt wird und hinter diesem einscheren möchte. Aufgrund der hierbei oftmals hohen Differenzgeschwindigkeit ist ein Unterschreiten des Sicherheitsabstands zu diesem Fahrzeug unkritisch. Der benötigte Sicherheitsabstand baut sich aufgrund der hohen Relativgeschwindigkeit sehr schnell wieder auf. Das Einhalten des vollen Sicherheitsabstandes würde hier durch den Fahrer als sehr träges Systemverhalten wahrgenommen. Aus diesem Grund wird der Sicherheitsabstand ähnlich wie in Hansen [2018] bei hohen Relativgeschwindigkeiten reduziert. Der reduzierte Sicherheitsabstandes wird folgendermaßen berechnet:

$$l_{a,Ziel,red}(t) = w_a(t) l_{a,Ziel}(t) \quad (3.26a)$$

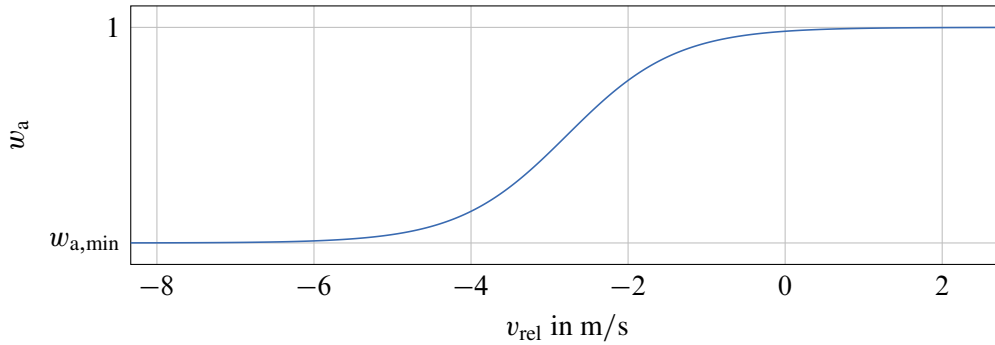
$$\text{mit} \quad w_a(t) = w_{a,min} + (1 - w_{a,min}) \underbrace{\frac{1}{1 + e^{-a_{sig}(v_{rel}(t) - b_{sig})}}}_{\text{Sigmoidfunktion}} \quad (3.26b)$$

$$\text{und} \quad v_{rel}(t) = v(t) - v_{FZ}. \quad (3.26c)$$

Der minimale Sicherheitsabstand ist $w_{a,min}$ und die Parameter der Sigmoidfunktion sind a_{sig} und b_{sig} . Mit letzteren können Position und Form des Übergangsbereichs zwischen minimalem und vollem Sicherheitsabstand eingestellt werden, siehe Bild 3.8. Für positive Relativgeschwindigkeiten wird näherungsweise stets der volle Sicherheitsabstand eingehalten. Dieselbe Reduktion kann analog auch bei einem Fahrstreifenwechsel nach rechts angewendet werden, wenn vor einem deutlich langsameren Fahrzeug eingeschert wird.

3.4.7 Auswahl der besten Trajektorie

Zur Auswahl der besten Trajektorie aus der Schar der kollisionsfreien kombinierten Längs- und Quertrajektorienpaare werden die Einzelkosten von Längs- und Quertrajektorie addiert, wodurch

Bild 3.8: Beispielhafter Verlauf des Parameters w_a

man die Gesamtkosten der Trajektorie erhält:

$$J_{\text{ges}} = J_{v,a} + J_d. \quad (3.27)$$

Die Trajektorie mit den geringsten Gesamtkosten wird als beste Trajektorie ausgewählt. Steht auf dem Steuergerät genug Rechenleistung zur Verfügung, ist es prinzipiell möglich, Trajektorien für verschiedene Szenarien innerhalb eines Planungszyklus zu berechnen. Denkbar wäre zum Beispiel, bei einem Fahrstreifenwechsel für jede vorhandene Lücke eine passende Trajektorie zu planen. Anschließend könnten dann die besten Trajektorien, die sich für die unterschiedlichen Lücken ergeben, noch miteinander verglichen werden.

3.4.8 Erweiterung auf drei Segmente

In Abschnitt 3.4.4–3.4.7 wurde beschrieben, wie mit Hilfe der Rasterplanung eine Trajektorie geplant wird, die aus einem Polynom in Längs- und einem Polynom in Querrichtung besteht. Diese Methodik wird nun dazu verwendet eine Trajektorie zu planen, die in Längsrichtung aus zwei und in Querrichtung aus drei Segmenten besteht, siehe Bild 3.9. Die Segmente werden im Folgenden beschrieben.

Segmente in Längsrichtung

Segment 1_v: In der Längsplanung wird nicht zwischen verschiedenen Manövern unterschieden. Segment 1_v beschreibt immer eine Normalfahrt. Ist ein vorausfahrendes Fahrzeug vorhanden, wird im Falle eines Fahrstreifenwechsels eine Trajektorie zum Folgen von FZ geplant. In jedem anderen Fall wird FS gefolgt. Die Manöverlänge von Segment 1_v ist Teil des diskretisierten Lösungsraums und dadurch individuell für jede Trajektorie innerhalb der Trajektorienschar. In Bild 3.9 ist die Unterteilung in die beiden Segmente für die ausgewählte blaue Trajektorie dargestellt. Segment 1_v kann allgemein frühestens bei $t_{e,v,\min}$ und muss spätestens bei $t_{e,v,\max}$ enden.

Segment 2_v: Zur Bewertung der Endkosten bei der Auswahl der besten Trajektorie (siehe Abschnitt 3.4.7) müssen alle Trajektorien dieselbe Zeitdauer haben. Hierzu werden alle Trajektorien aus Segment 1_v durch eine Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit auf dieselbe Endzeit verlängert.

Die Bewertung der Längstrajektorien erfolgt abschließend anhand von (3.15) für die zusammengesetzte Trajektorie aus Segment 1_v und Segment 2_v . Die erhaltenen Kosten werden mit $J_{v,S1-S2}$ bezeichnet.

Segmente in Querrichtung

Segment 1_d : Segment 1_d beschreibt stets das Halten des Fahrstreifens. Enthält das von der Fahrstrategie angeforderte Manöver keinen Wechsel des Fahrstreifens, dient dieses Segment zur primären Planung der Fahrzeugbewegung: dem Halten des Fahrstreifens. Soll jedoch ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt werden, wird dieses Segment dazu verwendet, sich einer Lücke gezielt anzunähern. Der eigentliche Fahrstreifenwechsel beginnt in diesem Fall erst in der Zukunft. Befindet sich eine geeignete Lücke bereits in unmittelbarer Nähe des Ego-Fahrzeugs, entfällt dieses Segment 1_d bei der Durchführung eines Fahrstreifenwechsels. Ebenso wie bei Segment 1_v ist die Länge von Segment 1_d für jede Trajektorie individuell. Da die Zielquerablage nicht gerastert wird, liegen alle Quertrajektorien in Segment 1_d übereinander und unterscheiden sich nur in ihrer zeitlichen Dauer.

Segment 2_d : Dieses Segment dient dazu, den eigentlichen Fahrstreifenwechsel durchzuführen. Für jede Trajektorie der Trajektorienschar aus Segment 1_d wird eine zweite Trajektorienschar generiert. Besteht die Trajektorienschar für das erste Segment aus n Trajektorien und die Trajektorienschar des zweiten Segments aus m Trajektorien, ergeben sich somit insgesamt $m \times n$ Trajektorien. Enthält das angeforderte Manöver keinen Fahrstreifenwechsel, entfällt dieses Segment.

Segment 3_d : Analog zu Segment 2_v dient dieses Segment dazu, alle Trajektorien auf die gleiche Zeitdauer zu erweitern. Hierzu werden, abhängig davon, ob das Manöver einen Fahrstreifenwechsel enthält oder nicht, die Trajektorien aus Segment 1_d bzw. 2_d durch ein Halten des Fahrstreifens entsprechend auf dieselbe Endzeit verlängert. Hierdurch ist auch die Überprüfung der Kollisionsfreiheit über das eigentliche Manöver hinaus möglich. Dadurch wird z. B. sichergestellt, dass der Fahrstreifenwechsel sanft in die Normalfahrt übergeht und keine zusätzlichen korrigierenden Eingriffe notwendig sind. Somit erhält man einen vorausschauenden Fahrstil.

Die Gesamtkosten einer Quertrajektorie berechnen sich aus der Summe der Kosten der einzelnen Segmente:

$$J_{d,S1-S3} = J_{d,S1} + J_{d,S2} + J_{d,S3}. \quad (3.28)$$

Die beste kombinierte Längs- und Quertrajektorie kann abschließend anhand der Summe der Einzelkosten bestimmt werden:

$$J_{\text{ges, 3 Segmente}} = J_{v,S1-S2} + J_{d,S1-S3}. \quad (3.29)$$

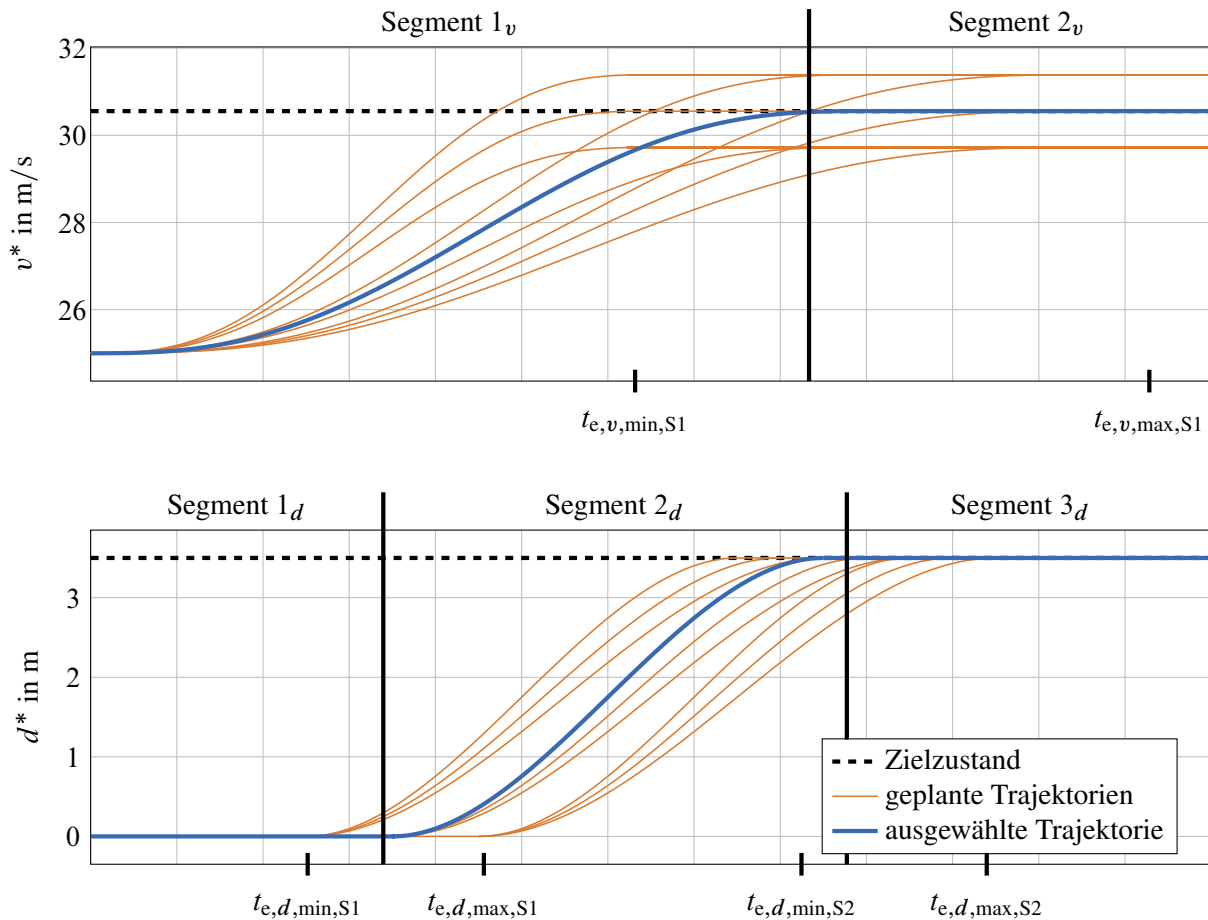


Bild 3.9: Darstellung der Drei-Segment-Rasterplanung für ein Fahrstreifenwechselmanöver mit gleichzeitiger Anpassung der Geschwindigkeit: Längstrajektorie (oben) und Quertrajektorie (unten). Für die ausgewählte Trajektorie ist zusätzlich die Einteilung in die einzelnen Segmente dargestellt.

3.5 Anwendung des Konzepts für Autobahnfahrten

Die vorgestellte Drei-Segment-Rasterplanung wird im Folgenden auf die einzelnen Manöver zur Durchführung einer vollständigen Autobahnfahrt angewandt. Die zur Bewegungsprädiktion der anderen Verkehrsteilnehmer verwendeten Modelle werden in Abschnitt 3.6 diskutiert. Daher wird an dieser Stelle nicht näher auf die Modelle eingegangen.

Normalfahrt

Die Normalfahrt besteht stets aus einem Halten des Fahrstreifens kombiniert mit einer Frei- oder Fahrgasse. Ob und wie auf ein vorausfahrendes Fahrzeug reagiert wird, ist durch die Kostenfunktion (3.15) vorgegeben. Die Normalfahrt wird vollständig im ersten Segment geplant und mit Hilfe des dritten Segmentes auf dieselbe zeitliche Länge zur Bewertung des Endzustands erweitert. Das zweite Segment entfällt.

Fahrstreifenwechsel

Der Fahrstreifenwechsel besteht aus bis zu drei Segmenten. Ist eine Lücke in unmittelbarer Nähe, kann Segment 1 entfallen; ansonsten wird es dazu genutzt, sich der Lücke gezielt anzunähern. Für einen Fahrstreifenwechsel müssen dabei zwei grundlegende Entscheidungen getroffen werden. Erstens muss eine geeignete Lücke ausgewählt werden, und zweitens muss festgelegt werden, an welcher Stelle die Lücke angefahren werden soll.

Für die Auswahl der passenden Lücke gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten: Die erste Möglichkeit besteht darin, eine passende Lücke vorab anhand einer geeigneten Heuristik auszuwählen. Anschließend wird nur für die ausgewählte Lücke eine passende Trajektorie geplant. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, eine Fahrstreifenwechseltrajektorie für jede Lücke zu planen und die Lücke anzufahren, deren Trajektorie die niedrigsten Kosten aufweist. Mit Hilfe der aktuellen Fahrzeugsensorik weisen Abstandsmessungen von Fahrzeugen mit großer Entfernung eine gewisse Unsicherheit auf. Die Planung einer Trajektorie in eine solche Lücke und damit auch die Kosten sind ebenso mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Dadurch ist eine sinnvolle Lückenauswahl anhand eines Kostenvergleichs nicht möglich. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine einfache Heuristik, ähnlich wie in Hansen [2018], verwendet: Auf der Autobahn haben Fahrstreifen, die sich rechts des Ego-Fahrzeugs befinden, normalerweise eine niedrigere und Fahrstreifen, die sich links des Ego-Fahrzeugs befinden, eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit. Bei einem Fahrstreifenwechsel nach links bietet es sich somit an, Lücken zu betrachten, die sich hinter oder auf gleicher Höhe des Ego-Fahrzeugs befinden. Diese Lücken nähern sich dem Ego-Fahrzeug an. Eine Lücke vor dem Ego-Fahrzeug wird bei einem Fahrstreifenwechsel nach links ausgeschlossen. Um eine solche Lücke anzufahren, könnte es notwendig werden, ein Fahrzeug auf dem linken Fahrstreifen rechts zu überholen. Dies ist auf deutschen Autobahnen abgesehen von wenigen Ausnahmen strafbar. Dieselben Überlegungen gelten für einen Fahrstreifenwechsel nach rechts, weshalb dort Lücken betrachtet werden, die sich vor dem Ego-Fahrzeug befinden.

Beim Anfahren der Lücke sollte der empfohlene zeitliche Sicherheitsabstand $T_{a,\text{Soll}}$ sowohl zum Heckfahrzeug als auch zum Frontfahrzeug auf dem Zielfahrstreifen eingehalten werden. Eine Lücke mit der Größe des doppelten Sicherheitsabstands ist auf der Autobahn jedoch selten zu finden. Ein Mindestsicherheitsabstand ist nicht festgelegt [StVO]. Laut Bußgeldkatalog [BKatV] kann ein Fahrer mit einem Bußgeld belegt werden, wenn er einen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug unterschreitet, der ein Viertel des Tachowerts in Metern beträgt. Dies entspricht einem zeitlichem Abstand von $T_{a,\text{min}} = 0,9 \text{ s}$. Wird der zeitliche Abstand fix auf $T_{a,\text{min}}$ gesetzt, führt dies dazu, dass sich das Ego-Fahrzeug am Ende des Fahrstreifenwechsels mit minimalen Sicherheitsabstand hinter dem Frontfahrzeug befindet. Im Anschluss an den Fahrstreifenwechsel muss daher der empfohlene Sicherheitsabstand wieder aufgebaut werden. Es ist daher nicht wünschenswert den minimalen Sicherheitsabstand einzustellen, wenn dies aufgrund der Lückengröße nicht zwingend erforderlich ist. Deshalb wird ein von der Lückengröße abhängiger Abstand gewählt:

$$l_{a,\text{Ziel,FZ}}(t) = \min(T_{a,\text{Soll}}, T_{a,\text{min}} + k_T T_{\text{frei}}(t)) v_{\text{FZ}}(t), \quad k_T \in [0, 1] \quad (3.30a)$$

$$\text{mit} \quad T_{\text{frei}}(t) = \frac{l_{\text{frei}}(t)}{v_{\text{FZ}}(t)}. \quad (3.30b)$$

Hierbei ist v_{FZ} die Geschwindigkeit von FZ und l_{frei} der befahrbare Bereich der Lücke, siehe Bild 3.10. Mit dem Einstellparameter k_T kann die Position innerhalb des befahrbaren Bereichs gewählt werden. Für $k_T = 0$ wird der minimale Sicherheitsabstand zu FZ eingestellt und bei $k_T = 1$ der minimale Sicherheitsabstand zu HZ. Für einen neutralen Fahrstil ist $k_T = 0,5$ eine sinnvolle Wahl. In diesem Fall hat das Ego-Fahrzeug sowohl zu FZ und HZ den gleichen Sicherheitsabstand. Für Fahrstreifenwechsel nach links bietet es sich jedoch an $k_T < 0,5$ zu wählen, wodurch der Sicherheitsabstand zu HZ etwas größer ist. Dadurch kommt es seltener zu einem Fahrstreifenwechselabbruch, wenn sich HZ sehr unkooperativ verhält, d. h. eine deutlich geringere Bremsbereitschaft aufweist, als angenommen. Um einen zu großen Zielabstand bei sehr großen Lücken zu vermeiden, ist der maximale zeitliche Zielabstand auf $T_{a,Soll}$ beschränkt.

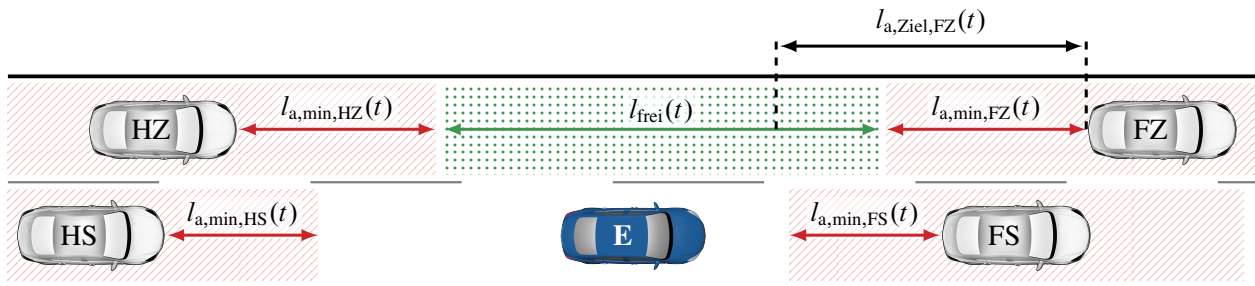


Bild 3.10: Darstellung der minimal einzuhaltenden Sicherheitsbereiche (rot), des befahrbaren Bereichs der Lücke auf dem Zielfahrstreifen (grün) und des Zielabstands zum Frontfahrzeug (schwarz) bei Durchführung eines Fahrstreifenwechsels und einer Wahl von $k_T = 0,25$

Autobahn-Auffahrt

Eine Auffahrt kann als ein Fahrstreifenwechsel nach links betrachtet werden, für den nur eine begrenzte Strecke zur Verfügung steht. Eine Anpassung des Trajektorienplaners für dieses Szenario gilt es zu vermeiden, da dieser so einfach wie möglich gehalten werden soll. Zur Umsetzung der Auffahrt wird daher ein virtuelles Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von Null an das Ende des Beschleunigungsstreifens gesetzt, siehe Bild 3.11. Kann keine Trajektorie zur Auffahrt gefunden werden, sorgt der Stillstands-Planer dafür, dass das Ego-Fahrzeug am Ende des Fahrstreifens hinter dem virtuellen Fahrzeug zum Stillstand kommt.

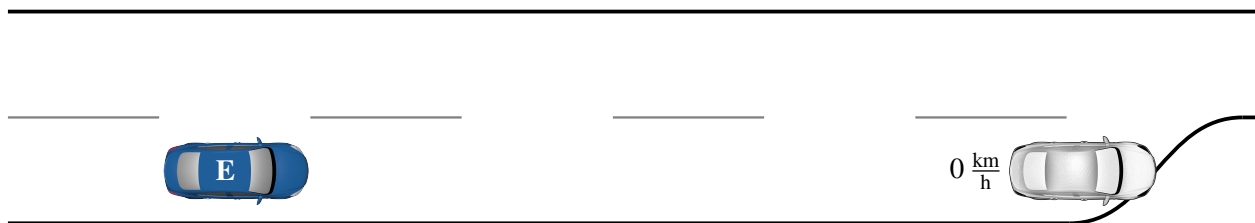


Bild 3.11: Darstellung des virtuellen Fahrzeugs am Ende des Beschleunigungsstreifens

Autobahn-Abfahrt

Die Abfahrt wird mit der gleichen Idee wie die Auffahrt umgesetzt. Hierzu wird ein virtuelles Fahrzeug mit Geschwindigkeit Null an den Beginn des Verzögerungstreifens gesetzt. Anschließend wird die Lücke ausgewählt, bei der das virtuelle Fahrzeug das HZ ist.

Stillstandstrajektorie

Die Stillstandstrajektorie soll das Fahrzeug in möglichst kurzer Zeit in den Stillstand abbremsen. Hierzu ist es notwendig, die maximale Verzögerung auszunutzen – weshalb zur Berechnung der Stillstandstrajektorie der dreistufige Vorgang zum Aufbau der maximalen Beschleunigung verwendet wird, siehe Abschnitt 3.4.4. Um das Fahrzeug gezielt an einer vorausliegenden Position in den Stillstand zu bremsen, ist es notwendig, sowohl die Endgeschwindigkeit als auch die Endposition vorzugeben. Die Vorgabe einer Endposition ist bei der Planung einer Geschwindigkeitstrajektorie nicht möglich. Daher wird überprüft, ob bei Aktivierung der Stillstandstrajektorie nach dem nächsten Planungszyklus der gewünschte Zielabstand unterschritten wird:

$$l_a(t_{e,v}) > l_{a,Ziel} - \int_{t_0}^{t_0 + T_{Zykl}} v(t) dt. \quad (3.31)$$

Ist dies der Fall, wird die Stillstandstrajektorie bereits im aktuellen Planungszyklus aktiviert.

3.6 Modelle zur Prädiktion von Fahrzeugbewegungen

Für die Berechnung einer kollisionsfreien Trajektorie ist es unerlässlich, die Bewegung der vier Umgebungsfahrzeuge möglichst korrekt zu prädictieren. In der Literatur sind aktuell drei Klassen von Prädiktionsmodellen zu finden:

- **Rein physikalische Modelle** beschränken sich auf die Prädiktion der Längsbewegung. Diese wird ausschließlich anhand kinematischer Zusammenhänge beschrieben und stellt somit stets eine Freifahrt dar.
- **Reaktionsmodelle** beschreiben ebenso nur die Längsbewegung. Im Gegensatz zu den rein physikalischen Modellen berücksichtigen sie jedoch die Intention des Fahrers. Viele Modelle unterscheiden hierzu zwischen Frei- und Fahrfahrt. Sie gehen davon aus, dass es die Intention des Fahrers ist, bei einer Freifahrt eine gewünschte Geschwindigkeit und bei einer Fahrfahrt einen Wunschabstand einzustellen. Im Fall einer Fahrfahrt wird somit auf die Bewegung des vorausfahrenden Fahrzeugs reagiert.
- **Vollständige Prädiktionsmodelle** prädictieren sowohl die Längs- als auch die Querbewegung. Sie benötigen zusätzlich zur Intention des Fahrers in Längsrichtung auch die Intention

des Fahrers in Querrichtung. Das exakte Modellieren eines solchen vollständigen Prädiktionsmodells ist schwierig. Aus diesem Grund wird es zumeist durch einen Entscheidungsprozess abgebildet, dessen Parameter durch ein lernendes Verfahren bestimmt werden (siehe z. B. [Augustin u. a., 2019]).

In Abschnitt 3.5 wurde das Fahrzeugumfeld auf vier Fahrzeuge reduziert und angenommen, dass alle Verkehrsteilnehmer bis auf das Ego-Fahrzeug den Fahrstreifen halten. Wird zur Prädiktion des Umfelds ein vollständiges Prädiktionsmodell verwendet, ist diese Annahme nicht mehr gültig, da die Prädiktion einen Fahrstreifenwechsel enthalten kann. Dadurch erhöht sich die Komplexität und damit auch die benötigte Rechenzeit. Aus diesem Grund werden die vollständigen Prädiktionsmodelle nicht weiter betrachtet. Die Bewegung der Umfeldfahrzeuge wird somit nur in Längsrichtung prädiziert und angenommen, dass die Fahrzeuge ihren Fahrstreifen nicht verlassen. Im Folgenden werden die rein physikalischen sowie die Reaktionsmodelle kurz vorgestellt und speziell auf ihre Eignung zur Prädiktion eines Fahrstreifenwechsels untersucht.

3.6.1 Rein physikalische Modelle

Die rein physikalischen Modelle basieren alle auf dem kinematischen Modell (2.2) und unterscheiden sich nur in der Beschreibung der Stellgröße und somit der Beschleunigung a_v . In der Literatur sind folgende vier Modelle zu finden:

- konstante Geschwindigkeit (kG)

$$a_v(t) = 0 \quad (3.32)$$

- konstante Beschleunigung (kB)

$$a_v(t) = a_{v,0} = \text{konst.} \quad (3.33)$$

mit $a_{v,0}$ als die zum Zeitpunkt t_0 gemessene Beschleunigung

- kurzzeitig konstante Beschleunigung (kkB) [Rathgeber, 2016]

$$a_v(t) = \begin{cases} a_{v,0}, & t < t_{\text{konst.}} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.34)$$

mit $t_{\text{konst.}}$ als frei wählbarer Parameter

- abklingende Beschleunigung (aB) [Hansen, 2018]

$$a_v(t) = a_{v,0} e^{-\frac{t-t_0}{\tau_a}} \quad (3.35)$$

Die Zeitkonstante der abklingenden Bewegung ist τ_a und kann, wie z. B. in Hansen [2018] vorgeschlagen, zu 5 Sekunden gewählt werden.

Ein Vergleich der verschiedenen Modelle für ein Bremsmanöver ist in Bild 3.12 zu sehen. In der Grafik ist gut zu erkennen, dass bei einem Prädiktionshorizont von 10 s weder das Modell mit konstanter Geschwindigkeit noch das Modell mit konstanter Beschleunigung zufriedenstellende Ergebnisse liefern. Die fehlende Berücksichtigung der gemessenen Beschleunigung beim kG führt dazu, dass das prädizierte Fahrzeug eine deutlich zu große Strecke zurücklegt. Im dargestellten Szenario ist die zurückgelegte Strecke des kG um 25 m größer als beim kkB. Ebenso wenig spiegelt die Reduktion der Geschwindigkeit um 10 m/s (36 km/h) beim kB in den meisten Fällen kein realistisches Szenario wider. Um dieses unverhältnismäßig starke Bremsen zu umgehen, wird beim kkB die gemessene Beschleunigung nur für einen kurzen Zeitraum konstant gehalten und beim aB klingt die Beschleunigung direkt kontinuierlich ab. Beide Modelle liefern quantitativ ähnliche Ergebnisse, die der Realität deutlich näher kommen als das kG- bzw. kB-Modell. Qualitativ ist das aB-Modell mit seinem stetigen Beschleunigungsverlauf dem kkB vorzuziehen. Der entscheidende Nachteil der physikalischen Modelle ist, dass sie keine Reaktion auf ein vorausfahrendes Fahrzeug abbilden. Dies führt bei kB, kkB und aB dazu, dass, wenn die gemessene Beschleunigung des hinteren Fahrzeugs einer Lücke größer ist als die des vorderen Fahrzeugs, sich die Lücke über den Verlauf des Prädiktionshorizonts verkleinert [Hansen, 2018].

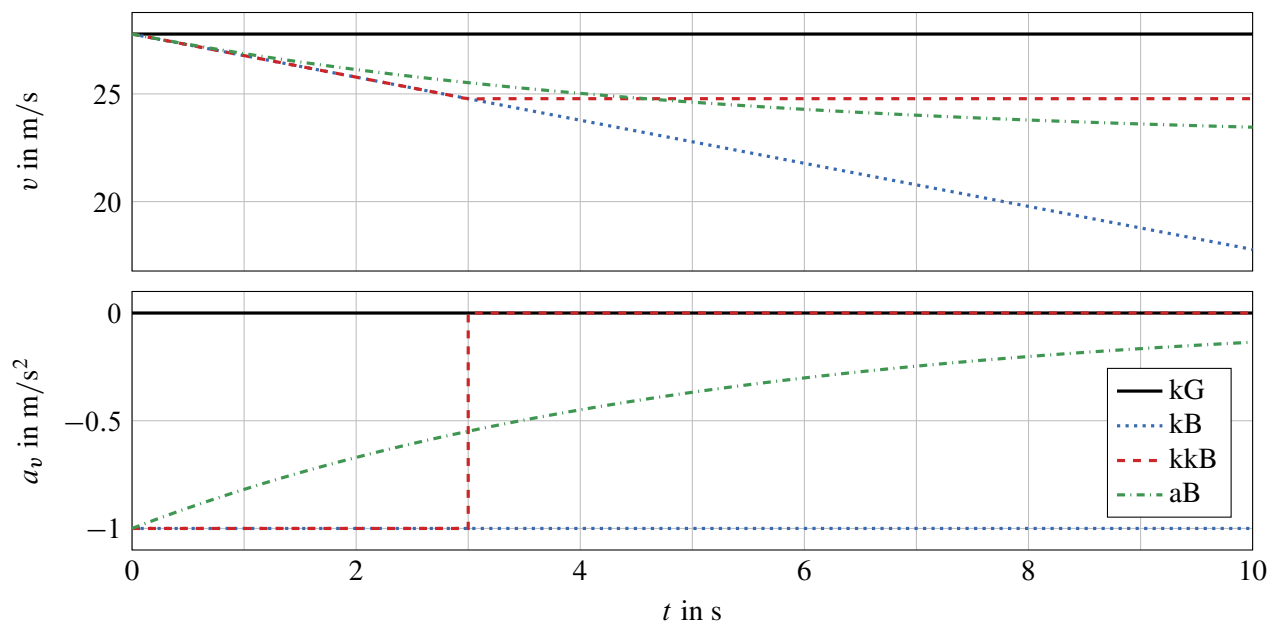


Bild 3.12: Vergleich der Prädiktionsverläufe der physikalischen Modelle für eine gemessene Beschleunigung von $a_{v,0} = -1 \text{ m/s}^2$: Geschwindigkeit (oben) und Beschleunigung (unten)

3.6.2 Reaktionsmodelle

Die Klasse der Reaktionsmodelle entstammt dem Bereich der Verkehrsflusssimulation. Diese versucht, das Verhalten der Gesamtheit aller sich auf einer Straße befindlichen Fahrzeuge zu beschreiben. Ziel ist es, zum Beispiel das Zustandekommen eines Verkehrszusammenbruchs oder die Fortpflanzung eines Staus nachzubilden. Bei der Modellierung wird zwischen makroskopischen und

mikroskopischen Modellen unterschieden. Die makroskopischen Modelle beschreiben direkt die Gesamtheit aller Fahrzeuge, z. B. anhand einer kinetischen Gasgleichung [Helbing u. a., 1999], und sind somit nicht geeignet für die Prädiktion eines einzelnen Verkehrsteilnehmers. Die mikroskopischen Modelle hingegen versuchen den Verkehrsfluss durch die Beschreibung des Verhaltens eines einzelnen Fahrzeugs nachzubilden. Sie werden in dieser Arbeit, wie bereits eingeführt, als Reaktionsmodelle bezeichnet. Reaktionsmodelle entstehen durch empirische Untersuchungen des Verkehrsflusses und versuchen diesen möglichst genau abzubilden. Daher haben Reaktionsmodelle oftmals eine große Anzahl an Parametern, die nicht interpretierbar sind. Die Verwendung solcher Modelle zur Prädiktion stellt sich somit als sehr schwierig heraus. Aus diesem Grund reduzieren sich die Betrachtungen in dieser Arbeit auf zwei Reaktionsmodelle, die ausschließlich interpretierbare Parameter besitzen.

Gipps-Modell

Das von Gipps [1981] veröffentlichte Reaktionsmodell umfasst zwei Modi: Freifahrt und Fahrgasse. Dabei wird zu jedem Zeitpunkt der konservativere der beiden Modi gewählt, d. h. der Modus mit der geringeren Beschleunigung. Die Freifahrt beschreibt eine asymptotische Annäherung an die Wunschgeschwindigkeit. Die Berechnung der Beschleunigung für die Fahrgasse beruht auf dem Ziel, eine Kollision zu vermeiden. Der Wunschabstand ist so ausgelegt, dass man im Falle einer Vollbremsung des vorausfahrenden Fahrzeugs exakt im Abstand $l_{a,konst.}$ hinter diesem zum Stehen kommt.

$$a_{v,Gipps}(t) = \min(a_{v,Gipps,Frei}(t), a_{v,Gipps,Folge}(t)) \quad (3.36a)$$

$$a_{v,Gipps,Frei}(t) = 2,5a_{v,Gipps,max} \left(1 - \frac{v(t)}{v_{Wunsch}}\right) \left(0,025 + \frac{v(t)}{v_{Wunsch}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.36b)$$

$$a_{v,Gipps,Folge}(t) = \left(b_{v,Gipps,min} - \frac{b_{v,Gipps,min}}{t_R^2} \left(2(l_{a,v} - l_{a,konst.}) - v(t)t_R - \frac{v_v^2(t)}{\hat{b}_{Gipps,min,v}}\right)\right)^{\frac{1}{2}} + b_{v,Gipps,min} - \frac{v(t)}{t_R} \quad (3.36c)$$

Verwendete Symbole

a_{Gipps}	ausgewählte Beschleunigung
$a_{\text{Gipps,Frei}}$	Sollbeschleunigung für eine Freifahrt
$a_{\text{Gipps,Folge}}$	Sollbeschleunigung für eine Folgefahrt
$a_{\text{Gipps,max}}$	maximale Beschleunigung
$b_{\text{Gipps,min}}$	maximale Verzögerung
$\hat{b}_{\text{Gipps,min,V}}$	maximale Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs
$l_{a,V}$	Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug
t_R	Reaktionszeit
v_V	Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs
v_{Wunsch}	Wunschgeschwindigkeit

Improved Intelligent Driver Model

Das Intelligent Driver Model wurde von Treiber u. a. [2000] entwickelt. Da es u. a. die stationäre Folgefahrt nicht korrekt beschreibt, wurde es von Tian u. a. [2016] zum improved Intelligent Driver Model (iIDM) weiterentwickelt. Das iIDM umfasst wie das Gipps-Modell zwei Modi, bei denen die Freifahrt eine asymptotische Annäherung an die Wunschgeschwindigkeit beschreibt. Im Gegensatz zum Gipps-Modell wird bei dem Folgemodus als Wunschabstand jedoch ein zeitlicher Sicherheitsabstand analog zu Abschnitt 3.4.4 verwendet. Zusätzlich wird der zeitliche Sicherheitsabstand als stochastische Größe modelliert, damit das menschliche Verhalten besser abgebildet wird. Um ein deterministisches Prädiktionsmodell zu erhalten, wird in dieser Arbeit eine leicht vereinfachte Version des iIDM verwendet.

$$a_{v,\text{iIDM}} = \begin{cases} a_{v,\text{iIDM,max}} \left(1 - \left(\frac{v(t)}{v_{\text{Wunsch}}} \right)^4 \right) \left(1 - \left(\frac{l_{a,V,\text{Wunsch}}(t)}{l_{a,V}(t)} \right)^2 \right), & l_{a,V}(t) \geq l_{a,V,\text{Wunsch}}(t) \\ a_{v,\text{iIDM,max}} \left(1 - \left(\frac{l_{a,V,\text{Wunsch}}(t)}{l_{a,V}(t)} \right) \right), & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.37)$$

Verwendete Symbole

$a_{v,\text{iIDM}}$	ausgewählte Beschleunigung
$a_{v,\text{iIDM,max}}$	maximale Beschleunigung
$l_{a,V,\text{Wunsch}}$	Wunschabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug

Anpassung der Reaktionsmodelle

Die beschriebenen Reaktionsmodelle wurden unter der Annahme entworfen, dass sich das vorausfahrende Fahrzeug nicht sprunghaft ändern kann. Bei einem Fahrstreifenwechsel tritt jedoch ge-

nau dieser Fall für die Prädiktion von HZ ein. Zunächst folgt HZ dem vorausfahrenden Fahrzeug, FZ. Sobald das Ego-Fahrzeug in den Zielfahrstreifen eindringt, ändert sich das vorausfahrende Fahrzeug sprunghaft und HZ folgt dem Ego-Fahrzeug. Schert das Ego-Fahrzeug dabei mit Unterschreitung des empfohlenen Sicherheitsabstands vor HZ ein, resultiert daraus ein sehr starkes Abbremsen. Der rückwärtige Verkehr wird im Normalfall über keine derart große Bremsbereitschaft verfügen. Aus diesem Grund ist es notwendig, die maximale Verzögerung dieser Modelle zu begrenzen. Die Reaktionsmodelle besitzen bereits Parameter zur Beschränkung der Beschleunigung. Diese dienen jedoch eher der Beschreibung der Aggressivität des Fahrstils als der tatsächlichen Beschreibung eines Limits. Aus diesem Grund wird die negative Beschleunigung zusätzlich auf ein unteres Minimum beschränkt, das einer realen Bremsbereitschaft deutlich näher kommt.

3.6.3 Auswahl der Prädiktionsmodelle

In Abschnitt 3.5 wurde das Umfeld auf vier Fahrzeuge reduziert. Es stehen somit keine Informationen zu Verfügung, ob die Fahrzeuge FS bzw. FZ eine Folge- oder eine Freifahrt durchführen. Ein Reaktionsmodell kann somit für die Prädiktion dieser Fahrzeuge nicht angewendet werden. Aus diesem Grund werden die Fahrzeuge FS und FZ mit dem physikalischen Modell der abklingenden Beschleunigung prädiziert. Für den rückwärtigen Verkehr hingegen ist es möglich, sowohl physikalische Modelle als auch Reaktionsmodelle zu verwenden. Reaktionsmodelle bieten die Möglichkeit, eine Folgefahrt abzubilden und können somit eine Reaktion auf den Fahrstreifenwechsel des Ego-Fahrzeugs abbilden. Hierdurch kann speziell bei der Planung eines Fahrstreifenwechsels eine Interaktion zwischen Ego-Fahrzeug und rückwärtigem Verkehr berücksichtigt werden. Demgegenüber stehen die Nachteile, dass Reaktionsmodelle deutlich mehr Parameter benötigen und aufwändiger in der Berechnung sind. Es stellt sich die Frage, ob ein Reaktionsmodell bei der Planung einen nennenswerten Vorteil gegenüber einem physikalischen Modell besitzt. Hierzu wird ein Auffahrtsszenario untersucht. Dabei versucht das Ego-Fahrzeug auf den rechten Fahrstreifen der Autobahn aufzufahren. Auf dem rechten Fahrstreifen herrscht dichter Verkehr, der mit einer konstanten Geschwindigkeit von 100 km/h fließt. Als Qualitätsmerkmal zum Vergleich der Modelle wird die minimale Lückengröße verwendet, bei der ein Fahrstreifenwechsel noch durchgeführt werden kann. Die minimale Lücke berechnet sich zu (vgl. Bild 3.10):

$$l_{\text{Lücke,min}}(t) = l_{\text{a,min,HZ}}(t) + l_{\text{frei,min}}(t) + l_{\text{a,min,FZ}}(t). \quad (3.38)$$

Hierbei ist $l_{\text{frei,min}}$ der minimale freie Bereich, der benötigt wird, um einen Fahrstreifenwechsel durchführen zu können. Umso realistischer ein Modell die Bewegung von HZ vorhersagt, desto kleinere Lücken können befahren werden. Untersucht werden das Modell mit abklingender Beschleunigung, das Gipps-Modell und das iIDM. Ergebnisse für die minimale Lücke für eine Reihe unterschiedlicher Startgeschwindigkeiten des Ego-Fahrzeugs $v_{\text{Ego,Start}}$ sind in Bild 3.13 zu sehen. Es ist klar zu erkennen, dass bei Verwendung des iIDM zur Prädiktion des rückwärtigen Verkehrs die kleinsten Lücken befahren werden können. Ist die Startgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs bereits zu Beginn identisch mit der Geschwindigkeit des Zielfahrstreifens, so ist es möglich, die theoretisch kleinstmögliche Lücke zu befahren, d. h. $l_{\text{frei,min}}(t) = 0$. Da HZ erst auf

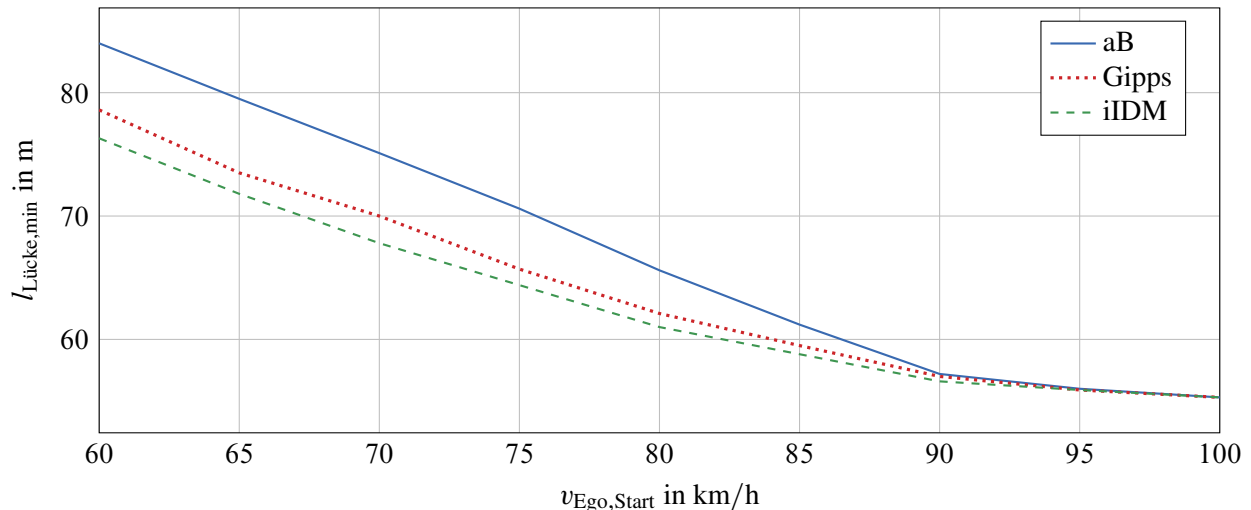


Bild 3.13: Darstellung der minimalen Lückengröße, ab der in Abhängigkeit der Startgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs und des verwendeten Prädiktionsmodells ein Fahrstreifenwechsel möglich ist

das Ego-Fahrzeug reagiert, nachdem es den Zielfahrstreifen belegt hat, können die Reaktionsmodelle für diese Startgeschwindigkeit kein besseres Ergebnis erzielen. Die Ergebnisse zeigen klar, dass die Verwendung eines Reaktionsmodells vorteilhaft ist und dass mit Hilfe des iIDM die besten Ergebnisse erzielt werden können. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit zur Prädiktion des rückwärtigen Verkehrs das iIDM verwendet.

3.7 Konzept zum Fahrstreifenwechselabbruch

Die erfolgreiche Durchführung eines Fahrstreifenwechsels ist primär mit der korrekten Erfassung des Fahrzeugumfelds und der darauf aufbauenden Prädiktion anderer Verkehrsteilnehmer verbunden. Wie in Abschnitt 3.6 beschrieben, kann die Bewegung des umgebenden Verkehrs nur bedingt vorhergesagt werden. Dadurch entstehen regelmäßig Situationen, in denen während der Durchführung eines Fahrstreifenwechsels keine gültige Trajektorie gefunden werden kann, die diesen erfolgreich zu Ende führt. Es muss eine Entscheidung getroffen werden, ob der Fahrstreifenwechsel trotz Verletzung der Sicherheitsabstände zu Ende geführt oder abgebrochen wird. Hierfür wird die Kritikalität der Fortsetzung und des Abbruchs mit einer einfachen Metrik bestimmt. Auf Basis der Kritikalität wird anschließend entschieden, ob der Fahrstreifenwechsel abgebrochen oder fortgeführt wird.

Kostenfunktion

Für die Berechnung der Kritikalität werden nur die Kosten im kritischsten Punkt zum jeweiligen Fahrzeug berücksichtigt. Zusätzlich werden nur Zeitpunkte betrachtet, zu denen sich sowohl

das Ego-Fahrzeug als auch das betrachtete Fahrzeug auf demselben Fahrstreifen befinden. Der kritischste Punkt wird durch die maximalen kritischen Kosten definiert:

$$J_{\text{krit},i} = \max_{t \in [0, t_e]} J_i(t), \quad i \in \{FS, FZ, HS, HZ\} \quad (3.39a)$$

$$\text{mit} \quad J_i(t) = \begin{cases} 0, & l_{a,i}(t) \geq \omega_a l_{a,\min,i}(t) \\ \left(\frac{l_{a,i}(t) - \omega_a l_{a,\min,i}(t)}{\omega_a l_{a,\min,i}(t)} \right)^2, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.39b)$$

Der aktuelle Abstand zum entsprechenden Fahrzeug ist $l_{a,i}$ und $\omega_a l_{a,\min,i}$ der reduzierte minimale Sicherheitsabstand (siehe Bild 3.10 und Abschnitt 3.4.6). $J_{\text{krit},i}$ sind die Kosten im kritischen Punkt. Diese bestrafen die prozentuale Unterschreitung des reduzierten minimalen Sicherheitsabstandes. Für den rückwärtigen Verkehr wird die Reaktion auf die Bewegung des Ego-Fahrzeugs wie bereits beschrieben mit Hilfe des iIDM vorhergesagt. Zur Bewertung der einzelnen Trajektorien wäre es prinzipiell möglich, die Kostenfunktion aus Abschnitt 3.4.7 um die Kosten $J_{\text{krit},i}$ der einzelnen Fahrzeuge zu erweitern. Die beste Trajektorie stellt dann einen Kompromiss aus Komfort und Kritikalität der Situation dar. In kritischen Situationen spielt der Komfort jedoch eine untergeordnete Rolle, weshalb eine neue Kostenfunktion aufgestellt wird. Diese setzt sich aus den Kosten der einzelnen Fahrzeuge und einer Bestrafung der lateralen Manöverdauer zusammen:

$$J_{\text{ges}} = k_{\text{krit}}(J_{\text{krit},FS} + J_{\text{krit},FZ} + J_{\text{krit},HS} + J_{\text{krit},HZ}) + k_{t_{e,d}} t_{e,d}. \quad (3.40)$$

Die kritischen Kosten der Fahrzeuge werden mit k_{krit} gewichtet. Die Gewichtung der kritischen Kosten wird dabei sehr hoch gewählt. Dadurch werden Trajektorien mit geringer Kritikalität gegenüber sehr kurzen Manöverdauern klar bevorzugt. Erst bei gleicher Kritikalität hat diejenige Trajektorie die geringeren Kosten, die das Manöver in kürzerer Zeit durchführt. Damit ein Abbruch ausgelöst wird, müssen die Kosten für die Fortsetzung des Fahrstreifenwechsels $J_{\text{ges},FW}$ die Kosten des Fahrstreifenwechselabbruchs $J_{\text{ges},A}$ übersteigen. Da der Fahrstreifenwechsel das von der Fahrstrategie gewünschte Manöver ist, wird dieser bevorzugt. Aus diesem Grund werden die Kosten des Abbruchs noch durch einen Faktor $k_A > 1$ gewichtet. Der Fahrstreifenwechsel wird abgebrochen, wenn gilt:

$$J_{\text{ges},FW} > k_A J_{\text{ges},A}. \quad (3.41)$$

Modifikation der Berechnung der Abbruchtrajektorie

Muss ein Fahrstreifenwechsel abgebrochen werden, soll dies möglichst schnell erfolgen und die Eindringtiefe in den Zielfahrstreifen möglichst klein gehalten werden. Der Komfort ist für ein Abbruchmanöver zweitrangig. Die Stellgröße für die Querbewegung wirkt auf die dritte Ableitung der Querposition. Ein schnelles Gegenlenken ist dadurch nicht möglich und die Abbruchtrajektorie wird als sehr träge empfunden. Diesem trägen Verhalten kann auf zwei Arten entgegenge wirkt werden. Man kann entweder die Begrenzung für die maximal zulässige Beschleunigung erhöhen oder die in (3.6) geforderte Stetigkeit der Ableitungen der Querablage beim aktuellen

Planungszyklus vernachlässigen. In Bild 3.14 sind diese beiden Optionen einer normal geplanten Abbruchtrajektorie gegenübergestellt. Es ist klar zu erkennen, dass sich mit den beiden Optionen nicht nur die Eindringtiefe, sondern auch die Dauer des Abbruchmanövers deutlich reduziert. Die Aufhebung der geforderten Stetigkeit liefert aus Planungssicht das beste Resultat. Jedoch ist die Fahrzeugführung nicht in der Lage dieser Trajektorie exakt zu folgen, da die Dynamik der Aktorik unberücksichtigt bleibt. Daher werden zur Berechnung der Abbruchtrajektorie die Beschleunigungsgrenzen erhöht.

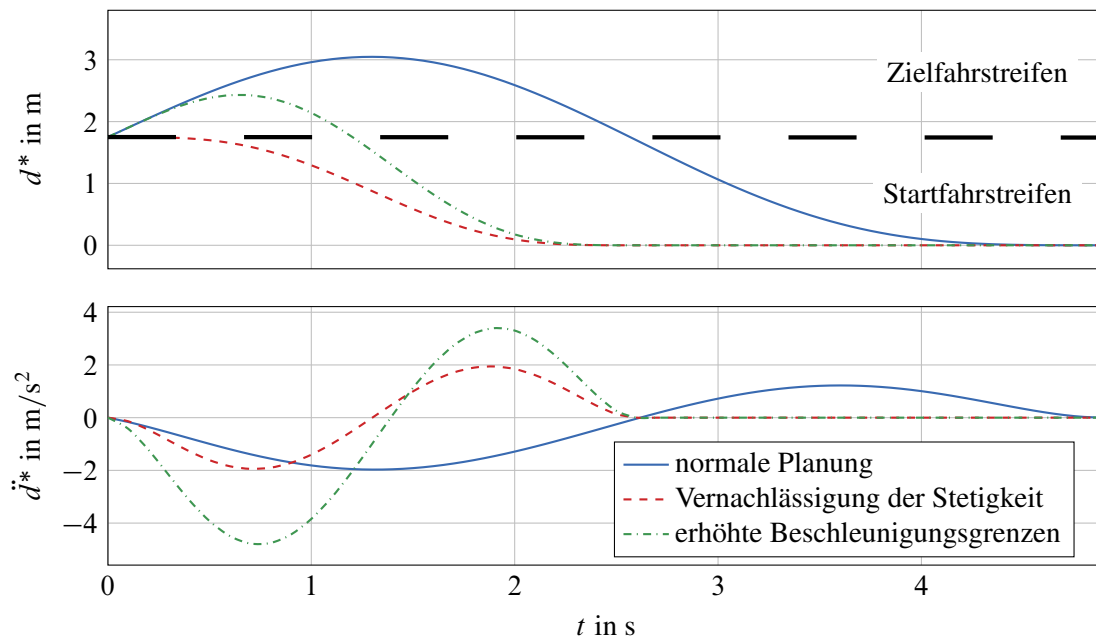


Bild 3.14: Vergleich der verschiedenen Berechnungsarten der Abbruchtrajektorie für eine Beschleunigungsgrenze von $|\ddot{d}| \leq 2 \text{ m/s}^2$ für eine normale Planung. Das Abbruchmanöver beginnt zum Zeitpunkt Null.

3.8 Simulationsergebnisse

Das beschriebene Konzept zur Trajektorienplanung wurde sowohl in einer Simulationsumgebung als auch in einem realen Versuchsfahrzeug implementiert. Die Ergebnisse im Versuchsfahrzeug werden in Kapitel 5 vorgestellt. Die Simulationsergebnisse dienen dazu, die prinzipielle Funktionsweise des Trajektorienplaners anhand eines ausgewählten Simulationsszenarios zu erläutern.

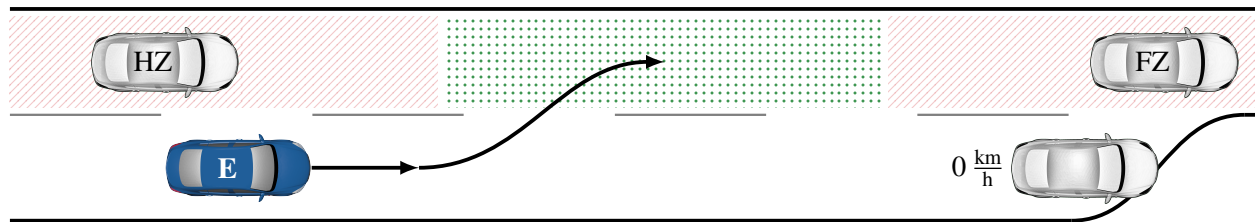


Bild 3.15: Auffahrtszenario auf die Autobahn mit virtuellem Fahrzeug am Ende des Beschleunigungsstreifens

Das Szenario beginnt mit einer Autobahnauffahrt auf den rechten Fahrstreifen. Dort herrscht eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 80 km/h, siehe Bild 3.15. Die Wunschgeschwindigkeit des Fahrers ist 100 km/h. Aus diesem Grund fordert die Fahrstrategie anschließend noch einen Fahrstreifenwechsel nach links an. Kurz nachdem dieser begonnen wurde, bremst FZ aufgrund eines plötzlich auftauchenden Verkehrsunfalls abrupt ab, siehe Bild 3.16. Der Trajektorienplaner findet somit keine gültige Fahrstreifenwechseltrajektorie mehr. Das Ego-Fahrzeug entscheidet anhand des vorgestellten Konzepts zum Fahrstreifenwechselabbruch, ob eine Fortsetzung des Fahrstreifenwechsels oder ein Abbruch das weniger kritische Manöver ist. In diesem Szenario ist der Fahrstreifenwechselabbruch das sicherere Manöver, weshalb der Fahrstreifenwechsel abgebrochen wird und das Ego-Fahrzeug auf den rechten Fahrstreifen zurückkehrt. Der Verlauf der geplan-

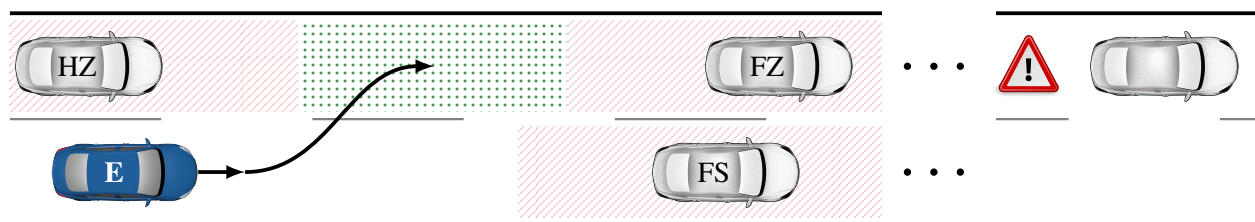


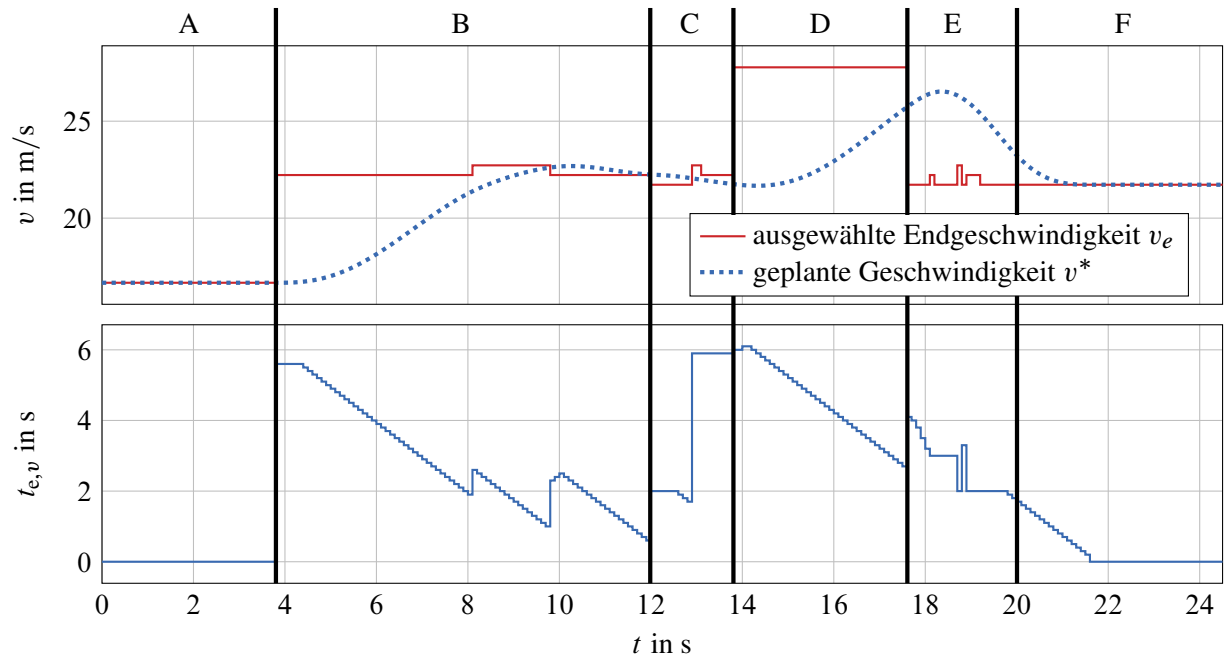
Bild 3.16: Fahrstreifenwechselszenario nach links bei plötzlich auftretendem Verkehrsunfall

ten Trajektorie und einiger Kenngrößen ist in Bild 3.17 dargestellt. Der Verlauf ist zum besseren Verständnis in fünf Abschnitte unterteilt und wird abschnittsweise erläutert:

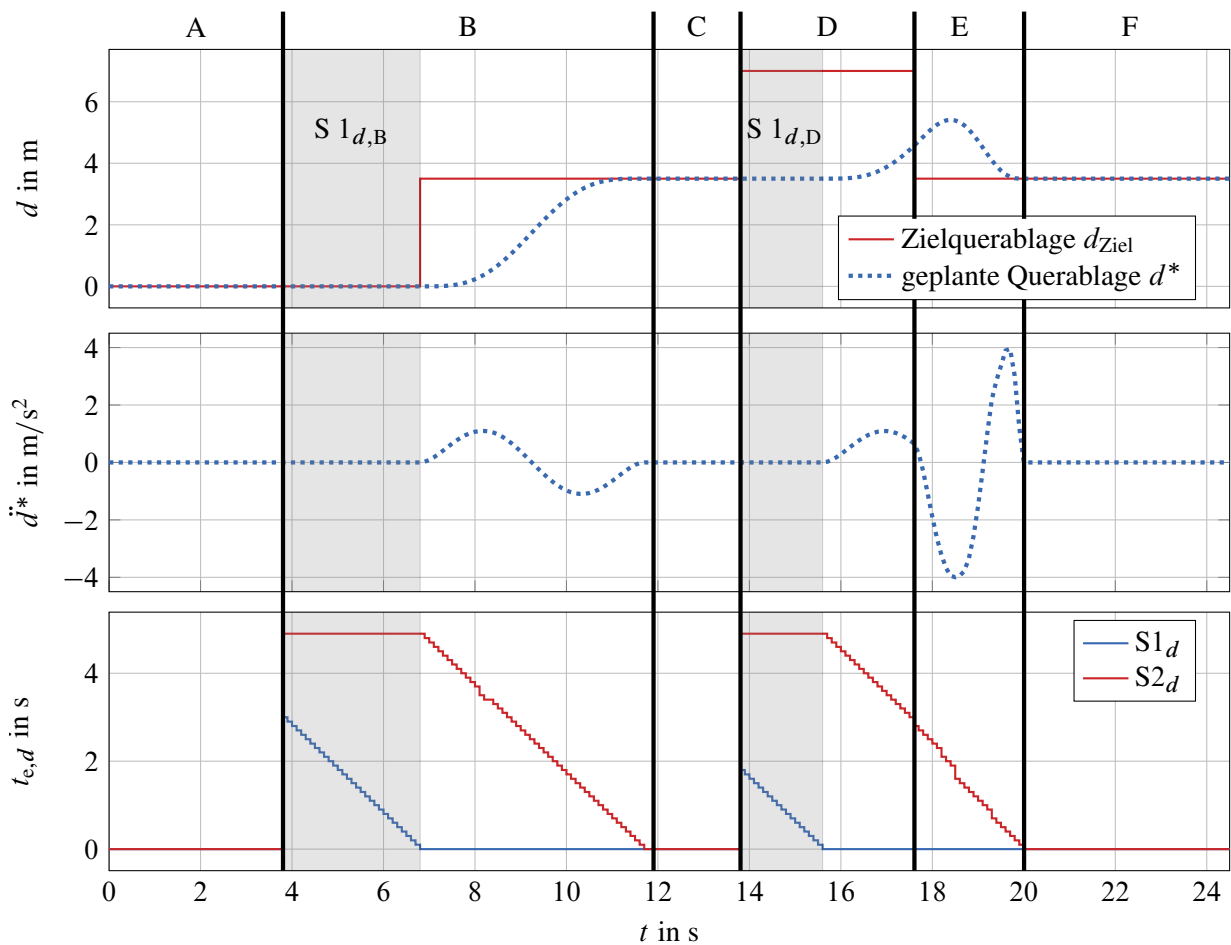
- **Abschnitt A:** Zu Beginn des Szenarios fordert die überlagerte Fahrstrategie das Auffahrmanöver an. Der Trajektorienplaner findet zunächst keine gültige Auffahrtrajektorie und befährt den Einfädelstreifen mit konstanter Geschwindigkeit. Die Zielgeschwindigkeit und auch die Zielquerablage wurden bereits erreicht weshalb die aktuellen Manöverlängen Null sind. Da Abschnitt A ein Fahrstreifenhalteverfahren darstellt, wird Segment 2_d nicht geplant.
- **Abschnitt B:** Es kann eine gültige Auffahrtrajektorie gefunden werden, und das Ego-Fahrzeug passt seine Geschwindigkeit dem Verkehr auf dem rechten Fahrstreifen der Autobahn an. Die Quertrajektorie besteht aus zwei Segmenten. Zur Unterscheidung der beiden Segmente ist Segment 1_d in Bild 3.17b grau hinterlegt. Segment 1_d wird dazu genutzt die Lücke gezielt anzufahren, bevor die Querbewegung in Segment 2_d beginnt. Je mehr sich die geplante Geschwindigkeit der Zielgeschwindigkeit annähert, desto kürzer wird die

Manöverlänge. Kurzzeitig wird eine höhere Zielgeschwindigkeit ausgewählt, was zu einer sprungartigen Änderung der Manöverdauer führt. Die Manöverlänge für Segment 1_d fällt kontinuierlich von Beginn des Abschnitts B bis zum Ende des ersten Segments. Solange Segment 2_d nicht aktiv ist, bleibt dessen Manöverlänge konstant und beginnt er erst nach Beginn des Fahrstreifenwechsels kontinuierlich zu fallen. Aufgrund der Lückengröße ist es nicht möglich, das Ego-Fahrzeug im empfohlenen Sicherheitsabstand von 1,8 s hinter FZ zu positionieren, weshalb ein geringerer Zielabstand gewählt wird (vgl. Abschnitt 3.5). Um den empfohlenen Sicherheitsabstand wieder einzustellen, wird ca. zwei Sekunden vor Ende des Abschnitts begonnen, die Geschwindigkeit geringfügig zu verringern.

- **Abschnitt C:** Dieser Abschnitt beschreibt ein Halten des Fahrstreifens, bei dem die in Abschnitt B begonnene Anpassung des Sicherheitsabstands fortgeführt wird.
- **Abschnitt D:** Direkt zu Beginn dieses Abschnitts wird ein Fahrstreifenwechsel nach links angefordert, und es wird auch sofort eine gültige Fahrstreifenwechseltrajektorie gefunden. Der Fahrstreifenwechsel verläuft hierbei analog zu Abschnitt B.
- **Abschnitt E:** Aufgrund des abrupten Abbremsens von FZ kann keine gültige Fahrstreifenwechseltrajektorie mehr gefunden werden. Die Abbruchtrajektorie wird als weniger kritisch betrachtet und der Fahrstreifenwechsel daher abgebrochen. Um diesen Abbruch möglichst schnell durchzuführen, werden deutlich größere Querschleunigungen zugelassen (vgl. Abschnitt 3.7). Die sehr kleinen Sprünge im Verlauf der ausgewählten Endgeschwindigkeit v_e sind der Tatsache geschuldet, dass die Prädiktion der anderen Verkehrsteilnehmer nur möglichst genau, aber nicht exakt mit deren wahren Bewegung übereinstimmt. Aus diesem Grund muss das Ego-Fahrzeug seine geplante Bewegung kurzfristig korrigieren.
- **Abschnitt F:** Nachdem das Ego-Fahrzeug sicher auf den Startfahrstreifen zurückgekehrt ist, wird die Geschwindigkeit weiter reduziert, um den empfohlenen Sicherheitsabstand wieder einzustellen.



(a) Verlauf der Geschwindigkeit und der ausgewählten Zielgeschwindigkeit (oben) und Verlauf der ausgewählten Manöverlänge zum Erreichen der Zielgeschwindigkeit (unten)



(b) Verlauf der aktuellen und der Zielquerablage (oben), Verlauf der Beschleunigung (Mitte) und ausgewählte Manöverlänge für die ersten beiden Segmente der Quertrajektorie (unten)

Bild 3.17: Simulationsergebnisse

4 Fahrzeugführung

Die Aufgabe der Fahrzeugführung ist die zielgerichtete Ansteuerung der Fahrzeugaktuatorik, um das Ego-Fahrzeug möglichst exakt entlang der in Kapitel 3 berechneten Trajektorie zu führen. Hierzu wurden zwei Konzepte zur Fahrzeugführung basierend auf einer Struktur mit zwei Freiheitsgraden entwickelt. Sowohl das erste Konzept der Exakten Eingangs-Ausgangs-Linearisierung als auch das zweite Konzept der nichtlinearen Vorsteuerung mit zeitvarianter Regelung ermöglichen es, die zeitvariante und nichtlineare Charakteristik des in Abschnitt 2.8 entwickelten Fahrzeugmodells im Entwurf zu berücksichtigen. Das Kapitel beginnt jedoch zunächst mit einer kurzen Einleitung, in der die Anforderungen an die Fahrzeugführung, die Auswahl der verwendeten Konzepte sowie die Struktur mit zwei Freiheitsgraden erläutert werden. Im Anschluss wird eine nichtlineare Koordinatentransformation eingeführt, die beide Konzepte als Grundlage benötigen. Nachfolgend werden die Fahrzeugführungskonzepte vorgestellt und das Kapitel schließt mit einem Vergleich dieser Konzepte einerseits strukturell und andererseits basierend auf Simulationsergebnissen.

Grundlegende Teile beider Konzepte wurden bereits in [Schucker und Konigorski, 2018] sowie [Schucker und Konigorski, 2019b] veröffentlicht.

4.1 Übersicht, Anforderungen und Grundlagen

Dieser Abschnitt gibt zunächst eine kurze Übersicht über die Einbettung der Fahrzeugführung in das Gesamtsystem gefolgt von der Ableitung der Anforderungen an die Fahrzeugführung. Anhand der Anforderungen wird die Auswahl der verwendeten Konzepte begründet. Abschließend wird die Struktur mit zwei Freiheitsgraden in ihrer allgemeinen Form vorgestellt.

4.1.1 Einbettung der Fahrzeugführung

In Bild 4.1 ist die Einbettung der Fahrzeugführung zu sehen. Die Fahrzeugführung läuft mit einer Zykluszeit von 10 ms. Dies entspricht einem Zehntel der Zykluszeit der Trajektorienplanung, d. h. innerhalb eines Planungszyklus werden zehn Stellsignale an das Fahrzeug gesendet. Als Stellgröße für die Fahrzeugführung wurden in Abschnitt 2.8.2 der Lenkwinkel δ_s und die Längskraft $F_{x,s}$ festgelegt. Der von der Fahrzeugführung angeforderte Lenkwinkel wird durch einen unterlagerten Lenkradwinkelregler eingeregelt. Dieser kann dem Lenkungssteuergerät ein Lenkmoment M_{δ_s} vorgeben. Die benötigten Messsignale erhält die Fahrzeugführung von einer Kamera und den fahrzeugintrinsischen Sensoren.

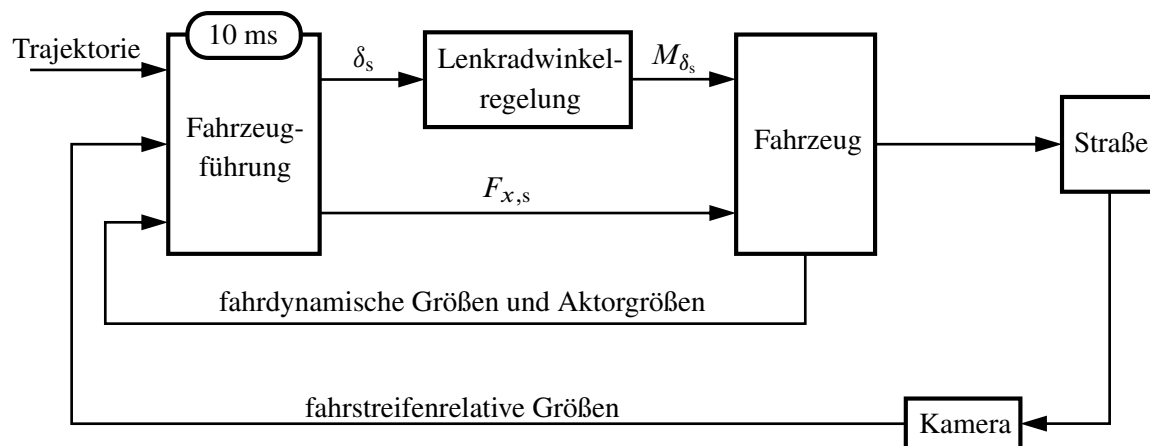


Bild 4.1: Einbettung der Regelung in das Gesamtsystem

4.1.2 Ableitung der Anforderungen an die Fahrzeugführung

Das exakte Führen des Ego-Fahrzeugs entlang einer Trajektorie benötigt häufige und vor allem schnelle Eingriffe, um z. B. plötzlich auftretende Störungen zu kompensieren. Selbst wenn diese Eingriffe gering und für den Fahrer nicht spürbar sind, kann er diese optisch durch die mechanische Kopplung der Lenkachse mit dem Lenkrad wahrnehmen. Dies vermittelt dem Fahrer ein Gefühl von Unsicherheit [Isermann, 2006]. Die Anforderung an das Folgeverhalten muss somit einen Kompromiss aus maximal tolerierbarer Abweichung und Fahrerkomfort darstellen. In Isermann [2006] wurde auf einem Autobahnabschnitt von 24 km Länge die durchschnittliche Standardabweichung eines menschlichen Fahrers von der Fahrstreifenmitte gemessen. Diese betrug ca. 0,06 m. Dies deckt sich mit der Erfahrung, dass ein Fahrer bei einer Querführung einen Toleranzbereich von ca. 0,15 m akzeptiert. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Erwartungen eines menschlichen Fahrers an ein Assistenzsystem höher sind als an sich selbst. Für automatisierte Fahrstreifenwechsel ist es einem Fahrer nicht möglich, die Abweichung von der geplanten Trajektorie wahrzunehmen (es sei denn, es kommt z. B. zu einem Überschwingen auf dem Zielfahrstreifen). Als sinnvoller Toleranzbereich bietet es sich folglich an, eine abgeschwächte Form der Anforderungen an das Halten eines Fahrstreifens zu verwenden. Eine Abweichung von der Geschwindigkeitstrajektorie kann der Fahrer nur im stationären Zustand optisch am Instrument ablesen, wenn Wunsch- und Istgeschwindigkeit nicht übereinstimmen. Bei einer digitalen Geschwindigkeitsanzeige ist dies nur dann möglich, wenn die Geschwindigkeitsabweichung größer als 0,5 km/h ist. Basierend auf diesen Betrachtungen und den bereits in Kapitel 1 dargelegten Punkten ergeben sich folgende Anforderungen:

- Die mittlere Standardabweichung von der Fahrstreifenmitte beim Halten eines Fahrstreifens darf maximal so groß sein wie die mittlere Abweichung eines menschlichen Fahrers, d. h. sie darf 0,06 m nicht übersteigen. Gleichzeitig soll die maximale Abweichung geringer als die bei einem menschlichen Fahrer sein, d. h. sie soll maximal 0,10 m betragen. Für Fahrstreifenwechsel werden diese Werte etwas abgeschwächt, so dass eine mittlere Abweichung von 0,10 m und eine maximale Abweichung von 0,15 m nicht überschritten werden darf.

- Die maximale Abweichung von der Geschwindigkeitstrajektorie bei stationärer Fahrt soll 0,5 km/h (bzw. 0,13 m/s) nicht überschreiten. Während eines dynamischen Manövers in Längsrichtung kann dieser Wert geringfügig überschritten werden.
- Das Regelgesetz soll eine Gültigkeit über den gesamten in dieser Arbeit betrachteten Geschwindigkeitsbereich (0 – 130 km/h) haben.
- Die gewählten Methoden sollen die nichtlinearen und zeitvarianten Eigenschaften sowie die Kopplung von Längs- und Querdynamik des Regelstreckenmodells aus Abschnitt 2.8 beim Entwurf berücksichtigen.
- Die Anzahl der Einstellparameter soll gering sein.
- Die Fahrzeugführung soll in Echtzeit ausführbar sein.

4.1.3 Auswahl der Konzepte zur Fahrzeugführung

Das Konzept zur Fahrzeugführung muss in der Lage sein, den nichtlinearen und zeitvarianten Charakter beim Entwurf zu berücksichtigen. Hierfür gibt es in der Literatur eine Vielzahl an Methoden [Adamy, 2014; Khalil, 2002]. Von Hahn [2017] wurde bereits die Anwendbarkeit einiger dieser Methoden für das automatisierte Fahren diskutiert. Control-Lyapunov-Funktionen (CLF), Backstepping-Verfahren (BV) oder Sliding-Mode-Regler (SMR) werden als ungeeignet bewertet. Die Gründe hierfür sind das Fehlen einer Ansatzfunktion bei CLF und BV, bedingt beeinflussbare Regelgüte bei BV oder zu hohe mechanische Beanspruchung der Aktorik durch schnelles Schalten zwischen zwei Regelgesetzen bei SMR. Zusätzlich haben die meisten nichtlinearen Ansätze einen verhältnismäßig hohen Entwurfsaufwand. Dies führt bei dem zur Konzeption von Regelungen häufig benötigten sich iterativ wiederholenden Entwurfsprozess zu einer deutlichen Aufwandssteigerung [Allgöwer u. a., 1993]. Auch die Anwendung einer nichtlinearen MPC-Regelung wird ausgeschlossen, da die Lösung eines nichtlinearen Optimierungsproblems, wie bereits im Kapitel zur Trajektorienplanung angesprochen, in Echtzeit nur schwer möglich ist. Geeignete Methoden hingegen sind die Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung sowie das Gain-Scheduling. Das in Abschnitt 2.8 entwickelte Regelstreckenmodell liegt bereits in der für die Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung vorteilhaften eingangsaffinen Form vor, weshalb diese Methode auch im Rahmen dieser Arbeit eine geeignete Wahl darstellt. Im Gegensatz zur Arbeit von Hahn wird in der vorliegenden Arbeit nicht nur die Querführung, sondern eine kombinierte Längs- und Querführung betrachtet. Bei einer reinen Querführung kann das Regelstreckenmodell innerhalb eines Geschwindigkeitsbereiches zu einem linearen Modell vereinfacht und für jeden Bereich ein linearer Regler entworfen werden. Die einzelnen Regler werden anschließend per Gain-Scheduling zu einem globalen Regler verbunden. Soll das Konzept jedoch speziell die Kopplung zwischen Längs- und Querführung berücksichtigen, kann die Geschwindigkeit im Modell nicht auf einen Parameter reduziert und die Längskraft F_x kann nicht einfach zu Null gesetzt werden. Für eine genaue Abbildung der gekoppelten Längs- und Querdynamik würde deshalb eine sehr große Anzahl an Arbeitspunkten entstehen. Ein klassisches Gain-Scheduling ist aus diesem Grund sehr aufwendig. Hinzu kommt, dass ein Gain-Scheduling durch den Entwurf von Reglern für verschiedene

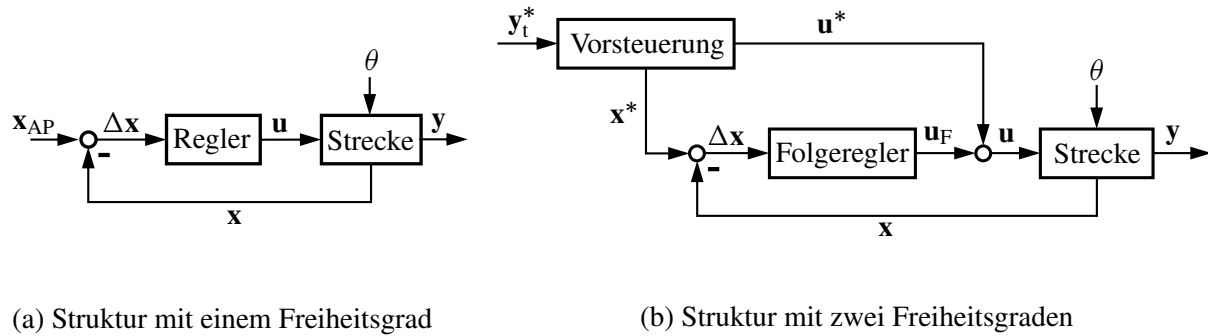


Bild 4.2: Mögliche Strukturen für die Fahrzeugführung für einen Regler in Form einer Zustandsrückführung

Arbeitsbereiche eine große Anzahl an Einstellparametern benötigt. Dies steht im Widerspruch zu den im vorherigen Kapitel definierten Anforderungen.

Die Linearisierung entlang einer Trajektorie ermöglicht den Einsatz einer weiteren Methode, die von Hahn noch nicht betrachtet wurde. Bei der Linearisierung entlang der Trajektorie entsteht ein lineares zeitvariantes Modell. Für dieses kann mit Hilfe von linearen zeitvarianten Regelgesetzen eine stabilisierende Rückführung gefunden werden. Das zeitvariante System ist immer nur genau solange gültig wie die zugrundeliegende Trajektorie. Aus diesem Grund muss für jede neue berechnete Trajektorie auch das zeitvariante Regelgesetz neu berechnet werden. Da für jede Neuberechnung des zeitvarianten Regelgesetzes dieselben Parameter verwendet werden können, stellt dies jedoch keinen zusätzlichen Entwurfsaufwand dar.

Sowohl die Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung, die im Abschnitt Kapitel 4.3 beschrieben ist, als auch die zeitvariante Regelung, die in Abschnitt Kapitel 4.4 erläutert wird, können direkt auf das verwendete Regelstreckenmodell angewendet werden. Sie stellen somit geeignete Entwurfsmethoden dar, die im Laufe dieses Kapitels in Bezug auf ihre Eignung zur Erfüllung der im vorherigen Kapitel gestellten Anforderungen untersucht werden.

4.1.4 Struktur mit zwei Freiheitsgraden

Die Begrifflichkeit der Struktur mit einem bzw. zwei Freiheitsgraden wurde von Horowitz [1963] eingeführt und wird in diesem Kapitel in Anlehnung an Deutscher [2012] erläutert. Eine Struktur mit einem Freiheitsgrad ist in Bild 4.2a dargestellt. Sie besteht lediglich aus der Strecke und der Regelung. Die Aufgabe des Reglers ist es, mittels einer geeigneten Stellgröße die messtechnisch nicht erfassbaren Störungen θ zu kompensieren und die Strecke um den vorgegebenen Arbeitspunkt \mathbf{x}_{AP} zu stabilisieren. Möchte man zusätzlich die Strecke entlang einer sich zeitlich ändernden Referenz \mathbf{y}_t^* führen, so muss die Auslegung des Reglers angepasst werden. Im Allgemeinen stehen die Anforderungen für das Führungsverhalten und das Störverhalten in einem gewissen Widerspruch, weshalb ein Kompromiss gefunden werden muss. Dies führt häufig zu einem inakzeptablen Führungsverhalten. Eine sinnvolle Anwendung für eine Struktur mit einem Freiheitsgrad beschränkt sich daher auf eine Festwertregelung, d. h. eine Regelung bei der der Ausgang

konstant bleiben soll. Diese Struktur ist damit nicht zum Folgen einer Trajektorie geeignet. Wird die Struktur um eine Vorsteuerung erweitert, erhält man eine Struktur mit zwei Freiheitsgraden, siehe Bild 4.2b. Diese besteht aus zwei frei wählbaren Komponenten: Der Vorsteuerung und dem Folgeregler. Mit Hilfe der Vorsteuerung kann das Folgeverhalten unabhängig vom Störverhalten ausgelegt werden. Die Berechnung der Stellgröße \mathbf{u}^* der Vorsteuerung erfolgt im Normalfall anhand des Regelstreckenmodells. Im störungsfreien Fall $\theta = 0$ und unter der Annahme, dass es keine Modellunsicherheit gibt, führt die Vorsteuerung die Strecke exakt entlang der gewünschten Trajektorie \mathbf{y}_t^* . Hierfür ist keine Messung notwendig, da im störungsfreien Fall das Systemverhalten und dadurch auch der Verlauf des Sollzustands \mathbf{x}^* vorausberechnet werden kann. Die Stellgröße der Folgeregelung \mathbf{u}_F wird dazu genutzt die nicht messbaren Störungen zu kompensieren und im Falle von Modellunsicherheiten die Vorsteuerung bei ihrer Führungsaufgabe zu unterstützen. Sie ist nur aktiv, wenn die Abweichung $\Delta \mathbf{x}$ vom Sollzustand ungleich Null ist. Die Struktur mit zwei Freiheitsgraden ist aus diesem Grund sehr gut geeignet, um exakt einer Trajektorie zu folgen. Dabei sei an dieser Stelle noch angemerkt, dass sehr unterschiedliche Ausgestaltungen der Struktur mit zwei Freiheitsgraden existieren. Die genaue Ausprägung hängt von der gewählten Methode der Vorsteuerung und der gewählten Folgeregelung ab.

4.2 Nichtlineare Koordinatentransformation

Die nichtlineare Koordinatentransformation ermöglicht es einerseits, das System in eine für den Reglerentwurf vorteilhafte Form zu bringen. Diese Eigenschaft wird bei der Exakten Eingangs-Ausgangs-Linearisierung ausgenutzt. Andererseits ermöglicht sie die Berechnung des Sollverlaufs des Zustandsvektors \mathbf{x}^* , der zum Entwurf der zeitvarianten Folgeregelung benötigt wird. Die folgenden Erläuterungen basieren auf Isidori [1995]. Zur Bestimmung der Koordinatentransformation werden zunächst zwei Begrifflichkeiten der Einfachheit halber für ein Eingrößensystem eingeführt. Gegeben sei das eingangsaffine System

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{a}(\mathbf{x}) + \mathbf{b}(\mathbf{x})u \\ y &= c(\mathbf{x}).\end{aligned}\tag{4.1}$$

- Lie-Ableitung

Sie beschreibt die Ableitung einer Funktion entlang eines Vektorfeldes. Für die Ableitung des Ausgangs $c(\mathbf{x})$ entlang des Vektorfeldes $\mathbf{a}(\mathbf{x})$ erhält man:

$$L_{\mathbf{a}}c(\mathbf{x}) = \frac{\partial c(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{a}(\mathbf{x}).\tag{4.2}$$

- Relativer Grad

Das System (4.1) hat den relativen Grad r falls

$$L_{\mathbf{b}}L_{\mathbf{a}}^k c(\mathbf{x}) = 0, \quad \text{für alle } k \in \{0, \dots, r-2\}\tag{4.3a}$$

$$L_{\mathbf{b}}L_{\mathbf{a}}^{r-1} c(\mathbf{x}) \neq 0.\tag{4.3b}$$

Der relative Grad gibt somit an, wie oft der Ausgang abgeleitet werden muss, bis er direkt von der Stellgröße abhängt. Besitzt ein System mehr als einen Ausgang, wird der relative Grad jedes einzelnen Ausgangs bestimmt. Anschließend können die relativen Grade der einzelnen Ausgänge in dem sogenannten vektoriellen relativen Grad $\mathbf{r}_v = [r_1, r_2, \dots]'$ oder im totalen relativen Grad $r_t = r_1 + r_2 + \dots$ zusammengefasst werden.

Die Lie-Ableitung wird nun dazu verwendet, den relativen Grad der Ausgänge des vollständigen Fahrzeugmodells (2.20) zu bestimmen. Hierzu werden die beiden Ausgänge so oft abgeleitet, bis sie direkt von mindestens einem Element der Stellgröße \mathbf{u} abhängen. Es muss beachtet werden, dass $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ von einem zeitvarianten Parameter $\kappa(t)$ abhängt. Hierdurch ergeben sich zusätzliche Terme bei der Ableitung. Für das erste Element des Ausgangs $h_1(\mathbf{x}) = v$ ergibt sich:

$$y_1 = h_1(\mathbf{x}) \quad (4.4a)$$

$$\dot{y}_1 = \frac{\partial h_1(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{f}(\mathbf{x}, \kappa) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u}) + \frac{\partial h_1(\mathbf{x})}{\partial \kappa} \dot{\kappa} = L_{\mathbf{f}}h_1(\mathbf{x}) + \underbrace{L_{\mathbf{g}}h_1(\mathbf{x})\mathbf{u}}_{=0} + \underbrace{L_{\dot{\kappa}}h_1(\mathbf{x})}_{=0} \quad (4.4b)$$

\vdots

$$\ddot{y}_1 = L_{\mathbf{f}}^3 h_1(\mathbf{x}) + L_{\mathbf{g}_1} L_{\mathbf{f}}^2 h_1(\mathbf{x}) u_1 + L_{\mathbf{g}_2} L_{\mathbf{f}}^2 h_1(\mathbf{x}) u_2. \quad (4.4c)$$

Da der Ausgang y_1 weder von κ noch von \mathbf{u} direkt abhängt, sind die entsprechenden Lie-Ableitungen in (4.4b) gleich Null. Analog zum ersten Ausgang ergibt sich für das zweite Element $h_2(\mathbf{x}) = d$:

$$\begin{aligned} \overset{(4)}{y}_2 &= L_{\mathbf{f}}^4 h_2(\mathbf{x}) + L_{\mathbf{g}_1} L_{\mathbf{f}}^3 h_2(\mathbf{x}) u_1 + L_{\mathbf{g}_2} L_{\mathbf{f}}^3 h_2(\mathbf{x}) u_2 \\ &+ \underbrace{L_{\mathbf{f}} L_{\dot{\kappa}} L_{\mathbf{f}}^2 h_2(\mathbf{x}) + L_{\dot{\kappa}} L_{\mathbf{f}}^3 h_2(\mathbf{x}) + L_{\ddot{\kappa}} L_{\mathbf{f}}^2 h_2(\mathbf{x}) + L_{\ddot{\kappa}} L_{\mathbf{f}}^3 h_2(\mathbf{x}) + L_{\ddot{\kappa}} L_{\dot{\kappa}} L_{\mathbf{f}}^2 h_2(\mathbf{x})}_{R(\mathbf{x}, \bar{\kappa})}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Dabei sind $\dot{\kappa}$, $\ddot{\kappa}$ die zeitlichen Ableitungen des zeitvarianten Parameters κ , die die drei Elemente des Vektors $\bar{\kappa} = [\kappa \ \dot{\kappa} \ \ddot{\kappa}]'$ darstellen. Anhand von (4.4c) und (4.5) lässt sich der vektorielle relative Grad zu $\mathbf{r}_v = [3, 4]'$ und der totale relative Grad zu $r_t = 7$ bestimmen. Auf Basis dieser Information wird folgende Koordinatentransformation angesetzt:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_{1,1} \\ \xi_{1,2} \\ \xi_{1,3} \\ \xi_{2,1} \\ \xi_{2,2} \\ \xi_{2,3} \\ \xi_{2,4} \\ \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dot{y}_1 \\ \ddot{y}_1 \\ y_2 \\ \dot{y}_2 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_2 \\ \Phi_8(\mathbf{x}) \\ \Phi_9(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(\mathbf{x}) \\ L_{\mathbf{f}}h_1(\mathbf{x}) \\ L_{\mathbf{f}}^2 h_1(\mathbf{x}) \\ h_2(\mathbf{x}) \\ L_{\mathbf{f}}h_2(\mathbf{x}) \\ L_{\mathbf{f}}^2 h_2(\mathbf{x}) \\ L_{\mathbf{f}}^3 h_2(\mathbf{x}) + L_{\dot{\kappa}} L_{\mathbf{f}}^2 h_2(\mathbf{x}) \\ \Phi_8(\mathbf{x}) \\ \Phi_9(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \Phi(\mathbf{x}). \quad (4.6)$$

Die beiden Elemente des Ausgangs sowie deren erste $(r_1 - 1)$ Ableitungen bzw. $(r_2 - 1)$ Ableitungen bilden die ersten sieben Zustände, die hier mit $\xi_{(\cdot)}$ bezeichnet werden. Die letzten beiden Zustände werden als die noch genauer zu spezifizierenden Transformationsvorschriften $\Phi_8(\mathbf{x})$ und $\Phi_9(\mathbf{x})$ gewählt und werden mit $\eta_{(\cdot)}$ bezeichnet. Ist die Jacobi-Matrix

$$\mathbf{M}_{\text{Jac}}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \Phi(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \quad (4.7)$$

regulär, d. h. $\det(\mathbf{M}_{\text{Jac}}(\mathbf{x})) \neq 0$, so stellt die Transformationsvorschrift $\Phi(\mathbf{x})$ einen Diffeomorphismus dar [Adamy, 2014]. Die Funktionen $\Phi_8(\mathbf{x})$ und $\Phi_9(\mathbf{x})$ sind dementsprechend so zu wählen, dass der Diffeomorphismus für einen möglichst großen Arbeitsbereich gültig ist. Für die folgende Wahl von $\Phi_8(\mathbf{x})$ und $\Phi_9(\mathbf{x})$ ist \mathbf{M}_{Jac} für $v \neq 0$ stets regulär:

$$\Phi_8(\mathbf{x}) = \dot{\psi} \quad (4.8)$$

$$\Phi_9(\mathbf{x}) = \psi_t. \quad (4.9)$$

Durch Ableiten der Transformationsvorschrift erhält man die Byrnes-Isidori-Normalform:

$$\dot{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} \dot{\xi}_{1,1} \\ \dot{\xi}_{1,2} \\ \dot{\xi}_{1,3} \\ \dot{\xi}_{2,1} \\ \dot{\xi}_{2,2} \\ \dot{\xi}_{2,3} \\ \dot{\xi}_{2,4} \\ \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_{1,2} \\ \xi_{1,3} \\ \rho_1(\xi, \eta, \mathbf{u}) \\ \xi_{2,2} \\ \xi_{2,3} \\ \xi_{2,4} \\ \rho_2(\xi, \eta, \mathbf{u}) \\ q_1(\xi, \eta) \\ q_2(\xi, \eta) \end{bmatrix} \quad \left. \begin{array}{l} \text{externe} \\ \text{Dynamik} \end{array} \right\} \quad (4.10)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{interne} \\ \text{Dynamik} \end{array} \right\}$$

mit

$$\rho_1(\xi, \eta, \mathbf{u}) = \ddot{y}_1 = L_f^3 h_1(\Phi^{-1}(\mathbf{z})) + L_{g_1} L_f^2 h_1(\Phi^{-1}(\mathbf{z}))u_1 + L_{g_2} L_f^2 h_1(\Phi^{-1}(\mathbf{z}))u_2 \quad (4.11a)$$

$$\begin{aligned} \rho_2(\xi, \eta, \mathbf{u}) &= \overset{(4)}{y}_2 = L_f^4 h_2(\Phi^{-1}(\mathbf{z})) + L_{g_1} L_f^3 h_2(\Phi^{-1}(\mathbf{z}))u_1 + L_{g_2} L_f^3 h_2(\Phi^{-1}(\mathbf{z}))u_2 \\ &\quad + R(\Phi^{-1}(\mathbf{z}), \bar{\kappa}) \end{aligned} \quad (4.11b)$$

$$q_1(\xi, \eta) = \ddot{\psi} \quad (4.11c)$$

$$q_2(\xi, \eta) = \dot{\psi}_t. \quad (4.11d)$$

Die externe Dynamik beschreibt hierbei die Änderung der Ausgänge und ihrer Ableitungen. Dieser Sachverhalt wird auch nochmals in Bild 4.3 veranschaulicht. Die Aufteilung des Systems in einen Teil, der das Ausgangsverhalten beschreibt, und einen Teil, der systeminterne Zustände beschreibt, wird beim Reglerentwurf für die Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung ausgenutzt.

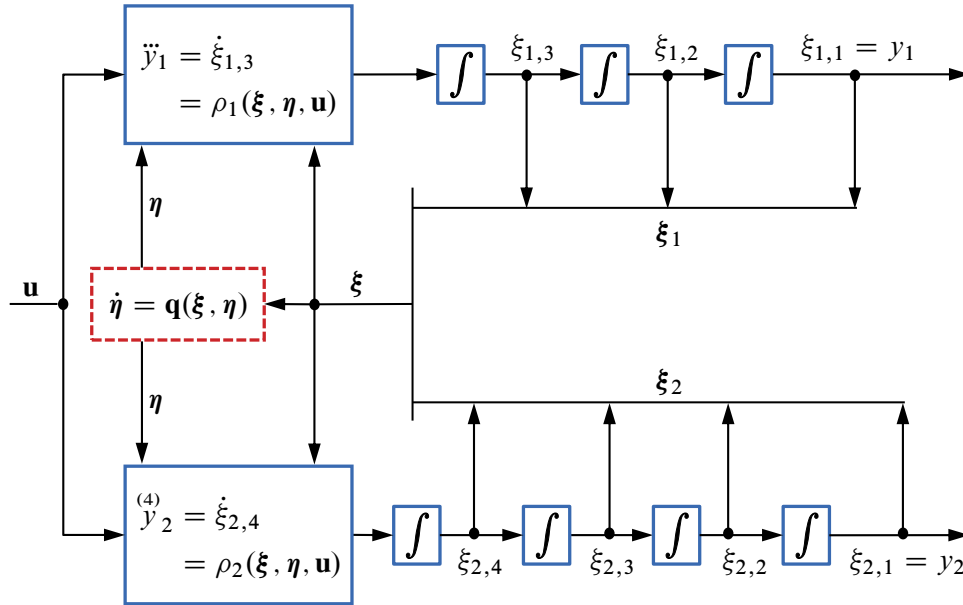


Bild 4.3: Schematische Darstellung der Byrnes-Isidori Normalform mit externer Dynamik (durchgezogen) und interner Dynamik (gestrichelt)

Zuletzt muss noch anhand der inversen Transformationsvorschrift der Sollverlauf des Zustandsvektors bestimmt werden. Hierfür wird der Sollverlauf des transformierten Zustands \mathbf{z}^* benötigt. Die hierin enthaltenen Zustände der externen Dynamik sind mit den im Sollverlauf der Trajektorie \mathbf{y}_t^* enthaltenen Zuständen identisch (vgl. Bild 3.3) und somit gegeben. Die Zustände der internen Dynamik hingegen sind nicht in der Trajektorie enthalten und müssen noch bestimmt werden. Hierzu wird die Differentialgleichung der internen Dynamik

$$\dot{\eta}^* = \mathbf{q}(\xi^*, \eta^*) \quad (4.12a)$$

mit den Anfangsbedingungen

$$\xi_0^* = \left[v^*(0) \quad \dot{v}^*(0) \quad \ddot{v}^*(0) \quad d^*(0) \quad \dot{d}^*(0) \quad \ddot{d}^*(0) \quad \ddot{d}^*(0) \right]' \quad (4.12b)$$

$$\eta_0^* = [0 \ 0]' \quad (4.12c)$$

numerisch integriert, siehe Bild 4.4. Die Anfangswerte für die Zustände der internen Dynamik können frei gewählt werden. Der in (4.12c) getroffenen Wahl der Anfangsbedingungen liegt die Annahme zugrunde, dass sich das Fahrzeug zu Beginn der Trajektorie tangential zur Fahrstreifenmitte bewegt und der Schwimmwinkel Null ist. Dies ist für das Halten des Fahrstreifens eine gerechtfertigte Annahme. Während eines Fahrstreifenwechsels ist diese Annahme jedoch unzutreffend. Da in dieser Arbeit die Trajektorien zyklisch neu berechnet werden, können die Anfangsbedingungen für die interne Dynamik direkt aus dem berechneten Zustandsverlauf der vorherigen Trajektorie entnommen werden:

$$\eta_0^* = \eta_{\text{alt}}(T_{\text{Zykl}}). \quad (4.13)$$

Hierdurch wird auch ein kontinuierlicher Verlauf der Zustände der internen Dynamik garantiert. Abschließend kann der Sollverlauf des Zustandsvektors mit der inversen Transformationsvorschrift bestimmt werden

$$\mathbf{x}^* = \Phi^{-1}(\mathbf{z}^*). \quad (4.14)$$

Eine Voraussetzung für die Integration der internen Dynamik ist deren Stabilität. Im vorliegenden

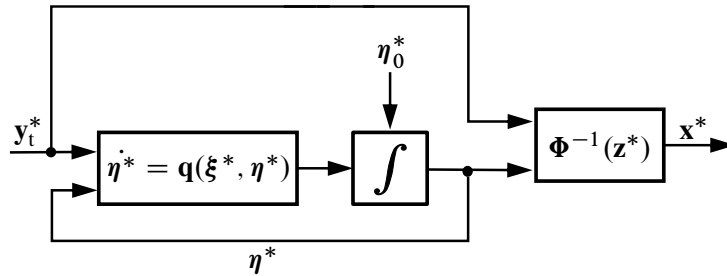


Bild 4.4: Berechnung für den Sollverlauf des Zustandsvektors

Fall ist die interne Dynamik nichtlinear und besitzt mehrere Ruhelagen, deren Stabilität untersucht werden muss. Verwendet man die indirekte Methode von Lyapunov zur Untersuchung der Stabilität, muss die interne Dynamik zunächst um die jeweilige Ruhelage linearisiert werden. Anschließend kann anhand der Eigenwerte der Systemmatrix der linearisierten internen Dynamik die Stabilität der entsprechenden Ruhelage bestimmt werden. Sind die Realteile aller Eigenwerte kleiner Null, so ist die Ruhelage stabil; ist ein Realteil größer Null, so ist die Ruhelage instabil. Eine Ausnahme bildet der Sonderfall, bei dem der Realteil mindestens eines Eigenwerts Null ist und die Realteile aller anderen Eigenwerte kleiner oder gleich Null sind. In diesem Fall kann keine Aussage über die Stabilität der Ruhelage gemacht werden [Adamy, 2014]. Bei der Untersuchung der Ruhelage in Null, einer Geradeausfahrt, tritt genau dieser Sonderfall ein. Eine Stabilitätsaussage mit der indirekten Methode ist daher nicht möglich. Für die direkte Methode von Lyapunov ist es notwendig, eine geeignete Lyapunov-Funktion aufzustellen. Leider konnte eine solche Funktion nicht gefunden werden. Aus diesem Grund wird das System um einen beliebigen Arbeitspunkt bei einer Geradeausfahrt mit konstanter Geschwindigkeit linearisiert. Für diesen Fall sind Längs- und Querdynamik entkoppelt. Die beiden Zustände der internen Dynamik können vollständig der Querdynamik zugeordnet werden. Es ist daher ausreichend, diese zu linearisieren. Für lineare Systeme sind die Eigenwerte der internen Dynamik identisch mit den Nullstellen der Übertragungsfunktion [Adamy, 2014]. Es genügt zu überprüfen, ob das Zählerpolynom der Übertragungsfunktion das Hurwitz-Kriterium erfüllt. Führt man die beschriebene Vereinfachung durch, erhält man folgendes Zählerpolynom:

$$p_Z(s) = vI_z s^2 + c_{\alpha_h} l_h^2 (l_h + l_f) s + (c_{\alpha_h} l_f + c_{\alpha_h} l_h) v. \quad (4.15)$$

Mit dem Hurwitz-Kriterium erhält man folgende Bedingungen

$$vI_z > 0 \quad (4.16a)$$

$$c_{\alpha_h} l_h^2 (l_h + l_f) > 0 \quad (4.16b)$$

$$(c_{\alpha_h} l_f + c_{\alpha_h} l_h) v > 0. \quad (4.16c)$$

Diese Bedingungen sind stets erfüllt, da $v = 0$ bereits für die Transformationsvorschrift ausgeschlossen wurde. Dieser Stabilitätsnachweis beschränkt sich auf einen sehr kleinen Arbeitsbereich. Es hat sich jedoch in der Praxis gezeigt, dass die interne Dynamik für den kompletten betrachteten Arbeitsbereich ein stabiles Integrationsverhalten aufweist.

4.3 Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung

Wie bereits bei der Auswahl der Konzepte zur Fahrzeugführung beschrieben, ist der Entwurf eines nichtlinearen Reglers häufig sehr aufwändig. Die Idee der Exakten Eingangs-Ausgangs-Linearisierung ist daher, das nichtlineare System in ein System mit linearem Ein-/Ausgangsverhalten zu transformieren, um anschließend einen linearen Reglerentwurf durchführen zu können. Dieser Vorgang kann in zwei Schritte unterteilt werden. Im ersten Schritt wird ein Kompensationsterm entworfen, der sämtliche Nichtlinearitäten kompensiert. Als Resultat erhält man ein System mit linearem Ein-/Ausgangsverhalten, siehe Bild 4.5. Der neue Eingang des sich linear verhaltenden Systems wird mit $\hat{\mathbf{u}}$ bezeichnet. Für dieses System kann im zweiten Schritt im Rahmen der Struktur mit zwei Freiheitsgraden ein beliebiger linearer Folgeregler entworfen werden. Die Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung gehört zur nichtlinearen geometrischen Regelungstheorie und wird im Folgenden basierend auf [Isidori, 1995] erläutert.

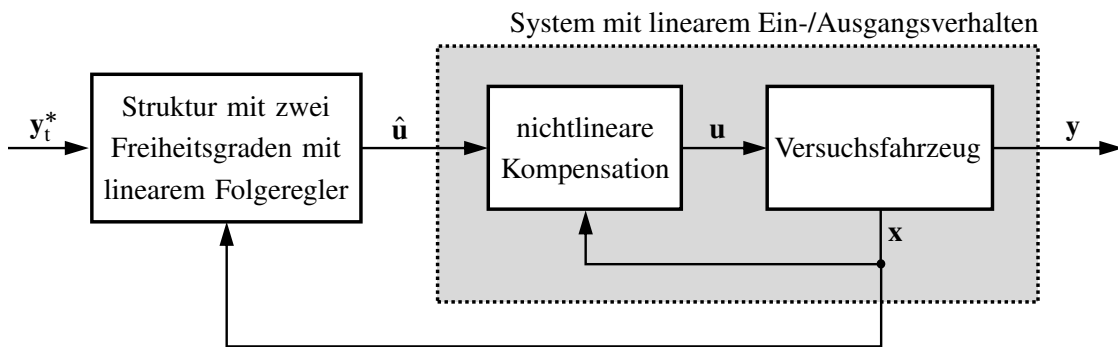


Bild 4.5: In dieser Arbeit verwendete Struktur der Exakten Eingangs-Ausgangs-Linearisierung

4.3.1 Schritt 1: Entwurf der Kompensation

Die Idee der Kompensation ist es, die nichtlinearen Terme der externen Dynamik, die in der Byrnes-Isidori-Normalform enthalten sind, durch eine geeignete Wahl von \mathbf{u} zu kompensieren. Hierfür werden die beiden Zeilen, die die Nichtlinearitäten enthalten (vgl. (4.11)), in Matrixschreibweise mit Originalkoordinaten umgeformt:

$$\begin{bmatrix} \rho_1(\Phi(\mathbf{x}), \mathbf{u}) \\ \rho_2(\Phi(\mathbf{x}), \mathbf{u}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \overset{(4)}{y}_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} L_f^3 h_1(\mathbf{x}) \\ L_f^4 h_2(\mathbf{x}) + R(\mathbf{x}, \bar{\kappa}) \end{bmatrix}}_{\mathbf{D}(\mathbf{x}, \bar{\kappa})} + \underbrace{\begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^2 h_1(\mathbf{x}) & L_{g_2} L_f^2 h_1(\mathbf{x}) \\ L_{g_1} L_f^3 h_2(\mathbf{x}) & L_{g_2} L_f^3 h_2(\mathbf{x}) \end{bmatrix}}_{\mathbf{E}(\mathbf{x})} \mathbf{u}. \quad (4.17)$$

Adamy [2014] bezeichnet (4.17) als Schlüsselgleichung der Exakten Eingangs-Ausgangs-Linearisierung. Es ist leicht zu sehen, dass die Nichtlinearitäten, die im Kompensationsvektor $\mathbf{D}(\mathbf{x}, \bar{\kappa})$ und in der Entkopplungsmatrix $\mathbf{E}(\mathbf{x})$ enthalten sind, durch folgende einfache Wahl von \mathbf{u} kompensiert werden können:

$$\mathbf{u} = \mathbf{E}^{-1}(\mathbf{x}) (\hat{\mathbf{u}} - \mathbf{D}(\mathbf{x}, \bar{\kappa})). \quad (4.18)$$

An dieser Gleichung lässt sich auch sehr gut erkennen, dass der Begriff Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung irreführend ist. Die Nichtlinearitäten werden nicht linearisiert, sondern durch eine nichtlineare Rückführung kompensiert. Der ursprünglich von Isidori [1995] verwendete Begriff "exact linearization via feedback" bringt diese Tatsache etwas besser zum Ausdruck. Voraussetzung für die Verwendung von (4.18) ist die Existenz von $\mathbf{E}^{-1}(\mathbf{x})$, d. h. $\det(\mathbf{E}(\mathbf{x})) \neq 0$. Dies ist für $v \neq 0$ gegeben. Bei genauerer Betrachtung von (4.18) kann man feststellen, dass es sich um eine Rechtsinverse des Systems handelt, die sogenannte Hirschorn-Inverse [Hirschorn, 1979]. Wendet man sie auf (4.17) an, so erhält man folgendes Resultat:

$$\begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ {}^{(4)}y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \end{bmatrix}. \quad (4.19)$$

Dieses System hat offensichtlich ein lineares Ein-/Ausgangsverhalten mit $\hat{\mathbf{u}} = [\hat{u}_1 \ \hat{u}_2]'$ als Stellgröße (vgl. Bild 4.5) und der Übertragungsmatrix

$$G(s) = \begin{bmatrix} s^{-3} & 0 \\ 0 & s^{-4} \end{bmatrix}. \quad (4.20)$$

Die Nebendiagonalelemente der Übertragungsmatrix sind beide Null, d. h. die Hirschorn-Inverse kompensiert nicht nur die Nichtlinearitäten, sondern entkoppelt die beiden Ausgänge. Die Stellgröße \hat{u}_1 beeinflusst nur den Ausgang y_1 , und \hat{u}_2 wirkt nur auf Ausgang y_2 . Diese Tatsache ist nochmals in Bild 4.6 dargestellt. Hier sieht man auch, dass im Gegensatz zu Bild 4.3 die interne Dynamik keinen Einfluss mehr auf das dynamische Verhalten des Ausganges hat. Sie beschreibt nur noch systeminterne Vorgänge, wovon sich auch deren Bezeichnung ableitet. Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 4.2 getroffenen Wahl für die interne Dynamik beschreibt sie anschaulich Gierbewegungen, die keinen direkten Einfluss auf den Verlauf der Querablage haben. Voraussetzung für die Verwendung der nichtlinearen Kompensation (4.18) ist die Stabilität der internen Dynamik. Diese wurde bereits im vorherigen Abschnitt diskutiert. Existenz und Dimension der internen Dynamik hängen maßgeblich von der Wahl des Ausganges und dem damit verbundenen totalen relativen Grad ab. Entspricht der totale relative Grad der Systemordnung, so entfällt die interne Dynamik. In diesem Fall existiert eine Exakte Eingangs-Zustands-Linearisierung des Systems, d. h. das nichtlineare System kann vollständig in ein lineares System überführt werden. Man bezeichnet Systeme mit dieser Eigenschaft als flach und den entsprechenden Ausgang als flachen Ausgang. Aus der Literatur ist für das verwendete vollständige Fahrzeugmodell (2.20) kein geeigneter flacher Ausgang bekannt. Ein Grund hierfür ist sicherlich die Tatsache, dass keine konstruktive Methode zur Bestimmung eines flachen Ausganges existiert [Adamy, 2014].

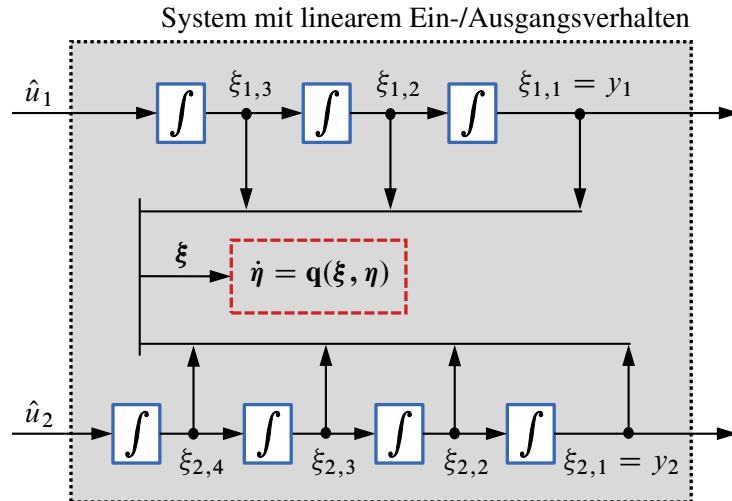


Bild 4.6: Schematische Darstellung des entkoppelten Systems mit linearem Eingangs-/Ausgangsverhalten: externe Dynamik (durchgezogen) und interne Dynamik (gestrichelt)

4.3.2 Schritt 2: Entwurf der Struktur mit zwei Freiheitsgraden

Entkopplung und Linearisierung des Ein-/Ausgangsverhaltens führen zu einer deutlichen Erleichterung des Reglerentwurfs. Einerseits ist es durch die Entkopplung möglich für jeden Ausgang einen Eingrößenregler zu entwerfen. Hierdurch kann das dynamische Verhalten für jeden Ausgang unabhängig von dem anderen Ausgang eingestellt werden. Andererseits ermöglicht die Kompensation der Nichtlinearitäten die Verwendung eines linearen Folgereglers. Im Prinzip kann eine beliebige lineare Regelungsmethode verwendet werden. Bei der Existenz von Modellfehlern kann es dazu kommen, dass Nichtlinearitäten im Regelkreis verbleiben. Dies kann speziell bei der Verwendung von linearen Robustheitsargumenten zu Problemen führen, weshalb diese mit entsprechender Vorsicht gebraucht werden sollten [Allgöwer u. a., 1993]. Mit Hilfe der Transformationsvorschrift (4.6) können alle Zustände des entkoppelten Systems berechnet werden, wodurch sich die Verwendung eines Zustandsreglers als sinnvoll erweist. Die linearen Systeme für die beiden Ausgänge stellen zwei Integratorketten dar, die sich lediglich in ihren Längen unterscheiden (siehe Bild 4.6). Der Entwurf der Struktur mit zwei Freiheitsgraden ist somit identisch für beide Ausgänge. Er wird im Folgenden beispielhaft für den ersten Ausgang, die Fahrzeuggeschwindigkeit v , entworfen. Beim Entwurf der Struktur mit zwei Freiheitsgraden soll dem System eine stabile Wunschdynamik aufgeprägt werden, die zusätzlich den Folgefehler asymptotisch gegen Null führt. Unter der Annahme, dass keine Modellunsicherheiten und keine Störgrößen existieren, kann das entkoppelte System (4.19) anhand der folgenden Vorsteuerung exakt entlang der Trajektorie geführt werden:

$$\hat{u}_1^* = \ddot{y}_1^*. \quad (4.21)$$

Eine aufwändige Berechnung der Vorsteuerung ist nicht notwendig. Es kann direkt eine in der vorgegebenen Trajektorie enthaltene Größe verwendet werden. Da in einem realen System stets Störungen und Modellunsicherheiten auftreten, wird die Vorsteuerung durch einen Folgeregler

ergänzt:

$$\begin{aligned}\hat{u}_{F,1} &= \hat{\gamma}_{1,1}(y_1^* - y_1) + \hat{\gamma}_{1,2}(\dot{y}_1^* - \dot{y}_1) + \hat{\gamma}_{1,3}(\ddot{y}_1^* - \ddot{y}_1) \\ &= \hat{\gamma}_{1,1}\Delta y_1 + \hat{\gamma}_{1,2}\Delta \dot{y}_1 + \hat{\gamma}_{1,3}\Delta \ddot{y}_1 = \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{\gamma}_{1,1} \\ \hat{\gamma}_{1,2} \\ \hat{\gamma}_{1,3} \end{bmatrix}}_{\hat{\gamma}_1}' \underbrace{\left(\begin{bmatrix} y_1^* \\ \dot{y}_1^* \\ \ddot{y}_1^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y_1 \\ \dot{y}_1 \\ \ddot{y}_1 \end{bmatrix} \right)}_{\Delta \mathbf{y}_1 = \mathbf{y}_1^* - \mathbf{y}_1} = \hat{\gamma}_1' \Delta \mathbf{y}_1.\end{aligned}\quad (4.22)$$

$\Delta y_1 = y_1^* - y_1$ ist der auszuregelnde Folgefehler und $\hat{\gamma}_{1,1}$, $\hat{\gamma}_{1,2}$ und $\hat{\gamma}_{1,3}$ stellen die Parameter des Folgereglers dar. Setzt man \hat{u}_1^* und $\hat{u}_{1,F}$ als Stellgröße in (4.19) ein und verschiebt \ddot{y}_1 auf die rechte Seite, so erhält man folgende Dynamik:

$$0 = (\ddot{y}_1^* - \ddot{y}_1) + \hat{\gamma}_{1,3}\Delta \ddot{y}_1 + \hat{\gamma}_{1,2}\Delta \dot{y}_1 + \hat{\gamma}_{1,1}\Delta y_1 \quad (4.23)$$

$$0 = \Delta \ddot{y}_1 + \hat{\gamma}_{1,3}\Delta \ddot{y}_1 + \hat{\gamma}_{1,2}\Delta \dot{y}_1 + \hat{\gamma}_{1,1}\Delta y_1. \quad (4.24)$$

Dies ist eine lineare und bei entsprechender Wahl der Parameter stabile Differentialgleichung, deren Zustand Δy_1 gegen Null konvergiert. Die Wahl der Vorsteuerung und Folgeregelung führt somit zu einer asymptotischen Ausregelung des Folgefehlers. Bild 4.7 zeigt die vollständige Struktur der Exakten Eingangs-Ausgangs-Linearisierung. Dabei ist

$$\mathbf{C}_1(\mathbf{x}) = \mathbf{y}_1 = [y_1 \ \dot{y}_1 \ \ddot{y}_1]' \quad (4.25a)$$

und

$$\mathbf{C}_2(\mathbf{x}) = \mathbf{y}_2 = [y_2 \ \dot{y}_2 \ \ddot{y}_2 \ \ddot{\ddot{y}}_2]'. \quad (4.25b)$$

Wahl der Parameter des Folgereglers

Eine gute Wahl der Parameter stellt in der Praxis stets eine große Herausforderung dar. Im Folgenden werden kurz die Überlegungen dargestellt, die im Rahmen dieser Arbeit angestellt wurden, um eine geeignete Wahl zu treffen. Die Wahl der Parameter erfolgt durch ein Polvorgabeverfahren. Dabei soll das charakteristische Polynom von (4.24) folgendem Wunschpolynom

$$0 = (s + p_1)(s + p_2)(s + p_3) \quad (4.26)$$

mit den Polen p_1 , p_2 und p_3 entsprechen. Hieraus ergibt sich für die Parameter des Folgereglers folgende Beziehung:

$$\begin{aligned}\hat{\gamma}_{1,3} &= p_1 + p_2 + p_3 \\ \hat{\gamma}_{1,2} &= p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_2 p_3 \\ \hat{\gamma}_{1,1} &= p_1 p_2 p_3.\end{aligned}\quad (4.27)$$

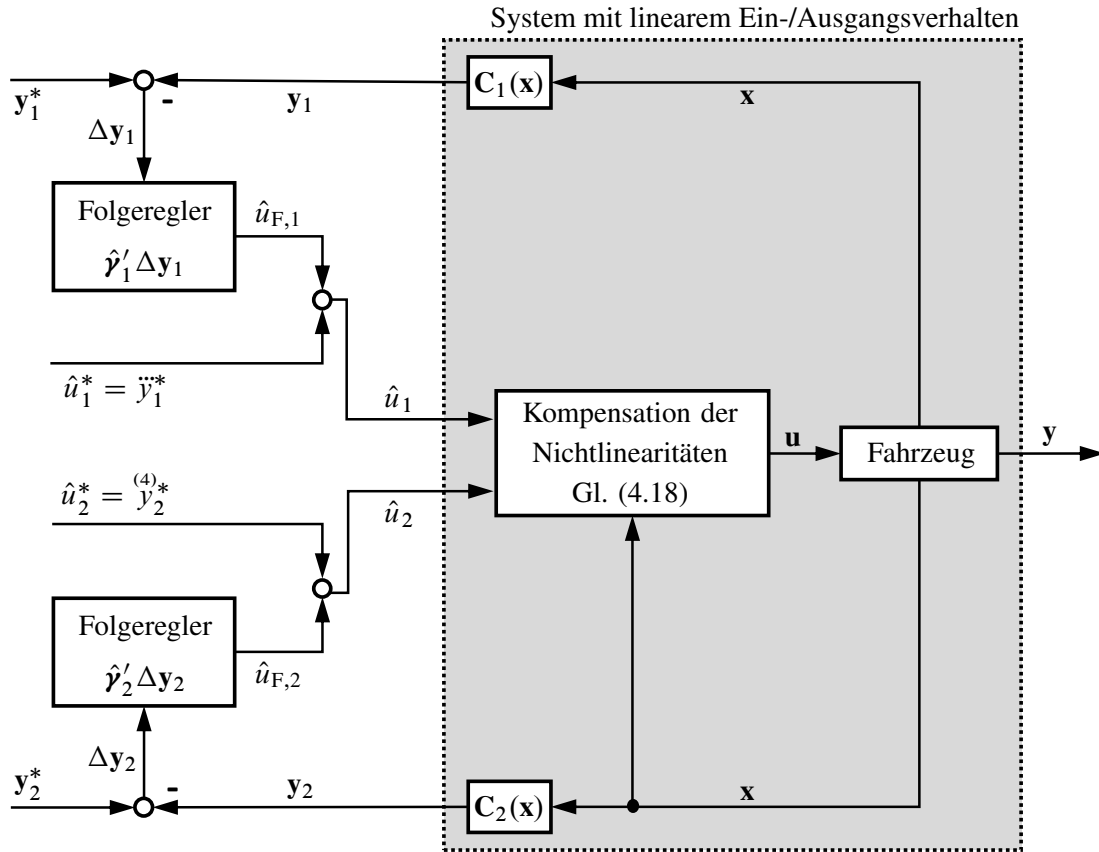


Bild 4.7: Schematische Darstellung der Exakten Eingangs-Ausgangs-Linearisierung mit Aufteilung in Kompensation der Nichtlinearitäten und eine lineare Struktur mit zwei Freiheitsgraden für jeden Ausgang

Die Zustände des Systems mit linearem Ein-/Ausgangsverhalten (4.19) stellen gerade den Ausgang und seine Ableitungen dar. Ziel ist es zum einen, dass dem Ausgang exakt gefolgt wird und zum anderen ein schnelles Ausregelverhalten zu erzielen. Dies wird erreicht, indem man die Abweichung des Ausgangs Δy_1 und die erste Ableitung des Ausgangs $\Delta \dot{y}_1$ am stärksten gewichtet, d. h. $\hat{\gamma}_{1,1}, \hat{\gamma}_{1,2} \gg \hat{\gamma}_{1,3}$. Als geeignete Wahl der Pole ergibt sich daraus z. B. $p_1, p_2 > p_3$.

Störgrößenbehandlung

Bei der Modellierung der Längsdynamik wurden Störgrößen, wie z. B. Luftwiderstand, Reibung oder Anstieg der Straße, vernachlässigt. Vereinfacht kann angenommen werden, dass diese Widerstände als eine Längskraft zusammengefasst werden können. Das heißt, die Fahrwiderstände greifen an derselben Stelle wie der Zustand F_x an. Der relative Grad bezüglich der Fahrwiderstände ist dadurch kleiner als der relative Grad bezüglich der Stellgrößen, d. h. die Fahrwiderstände beeinflussen das Fahrzeug direkter als die Stellgrößen. Eine statische Kompensation der Störgröße ist deshalb nicht möglich. Hinzu kommt, dass eine genaue Bestimmung der Störgrößen im Fahrzeug schwierig ist. Der Einfluss der Störgröße ist jedoch nur im stationären Fall signifikant, d. h. bei einer Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit. Aus diesem Grund wird eine einfache Alternative

gewählt, die darin besteht, den Folgeregler (4.22) durch einen Integralanteil zu ergänzen:

$$\hat{u}_{F,1} = \hat{\gamma}_{1,0} \int \Delta y_1 dt + \hat{\gamma}_{1,1} \Delta y_1 + \hat{\gamma}_{1,2} \Delta \dot{y}_1 + \hat{\gamma}_{1,3} \Delta \ddot{y}_1. \quad (4.28)$$

Der Integralanteil sorgt dafür, dass bei Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit die Fahrwiderstände kompensiert werden und der Folgeregler stationäre Genauigkeit erreicht, wenn sprungförmige Störungen auftreten.

Umgehung der Singularität

Wie bereits beschrieben existiert, die Inverse von $\mathbf{E}(\mathbf{x})$ für $v = 0$ nicht. Ein Bremsen in den Stillstand ist deshalb nicht möglich. Um die Singularität zu umgehen, kann das System in einer kleinen Umgebung um die Singularität herum näherungsweise linearisiert werden. Hierfür formuliert man eine Störfunktion:

$$\sigma(v) = \begin{cases} 0,5 \text{ m/s}, & \text{für alle } v \leq \epsilon \\ 0, & \text{für alle } v > \epsilon. \end{cases} \quad (4.29)$$

Der Grenzwert ϵ beschränkt die Umgebung, in der näherungsweise linearisiert wird. Als geeignete Wahl für ϵ hat sich 0,5 m/s ergeben. $\sigma(v)$ wird nun zu v hinzuaddiert:

$$\bar{v} = v + \sigma(v) \quad (4.30)$$

Hierdurch wird das System für $v > \epsilon$ exakt linearisiert bzw. es werden die Nichtlinearitäten exakt kompensiert. Für $v \leq \epsilon$ findet eine näherungsweise Kompensation statt. In der Praxis hat sich gezeigt, dass die näherungsweise Kompensation zu keiner Instabilität des Regelkreises führt.

4.4 Nichtlineare Vorsteuerung mit linearer zeitvarianter Regelung

Lineare zeitvariante Systeme, wie sie in diesem Kapitel betrachtet werden, entstehen durch Linearisierung eines nichtlinearen Systems entlang einer Trajektorie oder eines sich zeitlich ändernden Arbeitspunktes. Erhält man das System wie in dieser Arbeit durch eine Linearisierung entlang einer Trajektorie, so beschreibt das linearisierte zeitvariante Modell die Fehlerdynamik, also das Verhalten des Systems bezüglich einer Abweichung von der Trajektorie. Um das Fahrzeug exakt entlang der Trajektorie zu führen, wird die in Kapitel 4.1.4 beschriebene Struktur mit zwei Freiheitsgraden verwendet.

4.4.1 Entwurf der nichtlinearen Vorsteuerung

Für den Entwurf einer Vorsteuerung gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten [Deutscher, 2012]. Diese sind in Bild 4.8 dargestellt. Bei dem simulationsbasierten Vorsteuerungsentwurf geht man davon aus, dass kein Sollverlauf des Ausgangs, sondern lediglich ein Sollwert vorliegt. Die Idee des simulationsbasierten Ansatzes ist es, ein Modell der Strecke mit Hilfe eines Reglers in diesen

Zustand zu überführen. Da hierbei der vollständige Zustand vorliegt, wird häufig ein Zustandsregler verwendet. Die Form des sich ergebenden Sollverlaufs des Zustands hängt primär von der Wahl der Reglerparameter ab. Die Aufgabe der in diesem Abschnitt zu entwickelnden Fahrzeugführung ist es jedoch, einer vorgegebenen Trajektorie zu folgen. Die Form des Sollverlaufs des Zustandes ist damit bereits durch die Trajektorie vorgegeben und soll nicht durch die Vorsteuerung abgeändert werden. Um dies zu erreichen, ist es notwendig, den Zustandsregler als Folgeregler zu entwerfen. Eine Möglichkeit, dies zu tun, ist die im vorherigen Abschnitt vorgestellte Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung. Demgegenüber steht der inversionsbasierte Entwurf der Vorsteuerung. Wie der Name bereits vermuten lässt, wird bei diesem Ansatz versucht die Strecke, zu invertieren. Eine Voraussetzung für die Invertierbarkeit des Systems ist, dass dieses minimalphasig ist. Bei nichtlinearen Systemen ist es im Allgemeinen nicht trivial, eine Inverse zu finden. Lediglich für flache Systeme gibt es ein konstruktives Vorgehen für die Invertierung des Systems. Bei diesen Systemen entfällt in der Byrnes-Isidori-Normalform die interne Dynamik. Die externe Dynamik kann somit direkt nach der Stellgröße aufgelöst werden, wodurch man die Inverse des Systems erhält. Sind die Systemausgänge nicht flach, kann meist mit geringem Mehraufwand auf ähnliche Weise eine Inverse des Systems gefunden werden (vgl. Gleichung (4.14)). Der Nachteil des inversionsbasierten Vorsteuerungsentwurfs ist, dass der Sollverlauf des Ausgangs sowie dessen Ableitungen benötigt werden. Aus diesem Grund wurde in Kapitel 3 besonders darauf geachtet, dass die zur Trajektorienplanung verwendeten Modelle die Aktordynamik enthalten. Auch wenn die Aktormodelle nur in vereinfachter Form verwendet wurden, reicht dies aus, um die benötigte Stetigkeit der Ableitungen sicherzustellen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass für den vorliegenden Anwendungsfall die inversionsbasierte Vorsteuerung vorzuziehen ist. Sie bildet den Sollverlauf der Trajektorie exakt nach und ist im Vergleich zur simulationsbasierten Vorsteuerung auch deutlich weniger rechenintensiv. Die bei der inversionsbasierten Vorsteuerung benötigten Ableitungen sind bereits in der Trajektorie enthalten und stellen somit auch keine zusätzliche Implementierungshürde dar.

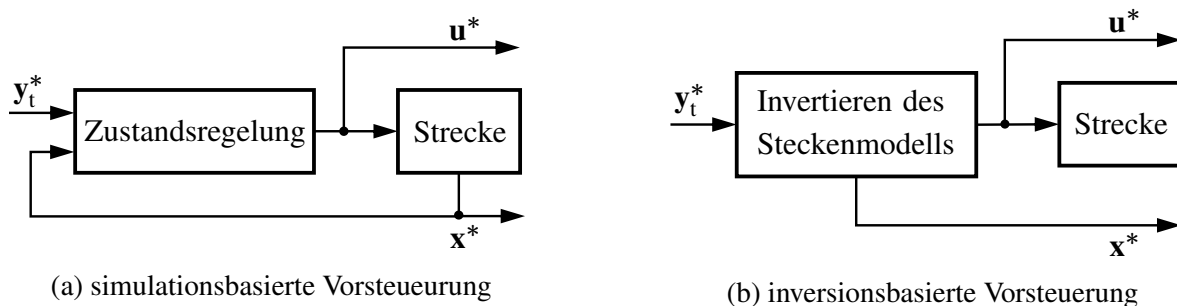


Bild 4.8: Grundstrukturen einer Vorsteuerung

Berechnung der Vorsteuerung durch Inversion des vollständigen Fahrzeugmodells

Aufgrund der Tatsache, dass die Ausgänge des vollständigen Einspurmodells nicht flach sind, muss ein kleiner Umweg zur Bestimmung der Inversen gegangen werden. Beim Entwurf der Exakten Eingangs-Ausgangs-Linearisierung wurde mit (4.18) bereits eine Rechtsinverse des Systems bestimmt. Diese hängt jedoch vom Systemzustand ab und nicht vom Ausgang. Es wird somit noch

eine Transformation des Ausgangs in den Systemzustand benötigt. Eine solche Transformation wurde in Abschnitt 4.2 bestimmt. Diese benötigt zusätzlich zum Verlauf der Ausgänge noch den Verlauf der Zustände der internen Dynamik. Die Bestimmung des Verlaufs der internen Dynamik wurde ebenso im genannten Abschnitt vorgestellt. Die Berechnung der Vorsteuerung erfolgt damit in drei Schritten:

1. Berechnung des Sollverlaufs der internen Dynamik η^* durch Integration von (4.12a)
2. Transformation der Sollverläufe der externen Dynamik ξ^* und der internen Dynamik η^* in einen Sollverlauf des Systemzustands \mathbf{x}^* anhand von (4.14)
3. Berechnung der Vorsteuerung unter Verwendung der Rechtsinversen (4.18) und dem Sollverlauf des Systemzustands

$$\mathbf{u}^* = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^2 h_1(\mathbf{x}^*) & L_{g_2} L_f^2 h_1(\mathbf{x}^*) \\ L_{g_1} L_f^3 h_2(\mathbf{x}^*) & L_{g_2} L_f^3 h_2(\mathbf{x}^*) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{y}_1^* - L_f^3 h_1(\mathbf{x}^*) \\ \overset{(4)}{y}_2^* - L_f^4 h_2(\mathbf{x}^*) - R(\mathbf{x}^*, \bar{\kappa}) \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

4.4.2 Zeitvarianter Riccati-Entwurf

Zeitvariante Regelungskonzepte finden bisher in der Praxis kaum Anwendung. Ein Grund hierfür ist sicherlich, dass die Vielzahl der bestehenden Entwurfsmethoden für lineare zeitinvariante Systeme nicht direkt auf zeitvariante Systeme übertragbar sind. Eine Möglichkeit ein zeitvariantes System zu regeln stellt Freund [1971] vor, welche der Einfachheit halber für ein Eingrößensystem erläutert wird. In einem ersten Schritt transformiert er das zeitvariante lineare System in Regelungsnormalform. Der Vorteil der Darstellung in Regelungsnormalform ist, dass sämtliche zeitvarianten Elemente in der letzten Matrix-Zeile liegen und die Stellgröße auch nur genau diese beeinflusst. Kompensiert man diese Zeitvarianz mit Hilfe einer geeigneten Rückführung, so resultiert ein zeitinvariantes Systemverhalten. Für dieses kann in einem zweiten Schritt mit Hilfe einer zeitinvarianten Entwurfsmethode eine Regelung entworfen werden. Für die Transformation in die Regelungsnormalform wird die zeitvariante Steuerbarkeitsmatrix benötigt. Zu deren Berechnung muss die zeitvariante Systemmatrix $(n-2)$ -mal abgeleitet werden, wobei n die Systemordnung ist. Die Berechnung dieser Ableitungen ist für das vorliegende Modell nur numerisch möglich. Aufgrund der Höhe der Ableitungen ist die numerische Bestimmung der Ableitungen jedoch zu ungenau, wodurch eine exakte Transformation in Regelungsnormalform nicht möglich ist. In [Bahadorian u. a., 2014] wird eine zeitvariante Entwurfsmethode vorgestellt, die auf der Optimierung einer Gütefunktion basiert. Die optimale Lösung wird numerisch bestimmt. Das numerische Lösen eines Optimierungsproblems wurde jedoch bereits bei der Trajektorienplanung als zu rechenintensiv bewertet. Im Allgemeinen ist es selbst für ein lineares System, wie es in diesem Kapitel betrachtet wird, sehr schwierig, eine analytische Lösung für ein Optimalsteuerungsproblem zu finden. Athans u. a. [1966] schlagen daher die Verwendung einer quadratischen Gütefunktion vor. Für diese kann das optimale Steuergesetz in einfacher Weise bestimmt werden. Die entstehende Regelung wird allgemein als (zeitvarianter) Riccati-Regler bezeichnet. Aufgrund

ihres einfachen Entwurfs und des ebenfalls einfachen Regelgesetzes, das sich als Lösung des Optimalsteuerungsproblems als lineare zeitvariante Zustandsrückführung ergibt, ist sie bestens für die Stabilisierung des zeitvarianten linearen Systems geeignet. Sie wird im Folgenden anhand der aus [Athans u. a., 1966] entnommenen Theorie vorgestellt. Zum Entwurf des zeitvarianten Riccati-Reglers muss zunächst das vollständige Einspurmodell mit Hilfe der in der Vorsteuerung generierten Sollverläufe entlang der Trajektorie linearisiert werden:

$$\mathbf{A}(t) = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*} \quad (4.32a)$$

$$\mathbf{B}(t) = \left. \frac{\partial (\mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*} \quad (4.32b)$$

$$\mathbf{C}(t) = \left. \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*}. \quad (4.32c)$$

Mit den zeitvarianten Systemmatrizen $\mathbf{A}(t)$, $\mathbf{B}(t)$ und $\mathbf{C}(t)$ kann das zeitvariante lineare Modell aufgestellt werden:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}_F \quad (4.33a)$$

$$\Delta \mathbf{x}(0) = \Delta \mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_0^* - \mathbf{x}_0 \quad (4.33b)$$

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(t)\Delta \mathbf{x}. \quad (4.33c)$$

Das System beschreibt die Fehlerdynamik mit dem Trajektorienfolgefehler $\Delta \mathbf{x}$ als Zustand. Das Ziel der Folgeregelung ist es, den Trajektorienfolgefehler gering zu halten, d. h. im Idealfall $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x}^* - \mathbf{x} = 0$ zu erreichen. Genaugenommen reduziert sich das Folgeregelungsproblem dadurch zu einer Einregelung des Arbeitspunktes $\Delta \mathbf{x} = 0$. Aus diesem Grund wird der Riccati-Regler als zeitvarianter LQR (Linear Quadratic Regulator) und nicht als zeitvarianter LQT (Linear Quadratic Tracking Controller) ausgelegt. Zur Bestimmung des optimalen Riccati-Reglers wird folgendes quadratisches Gütefunktional angesetzt:

$$J(\mathbf{u}_F) = \frac{1}{2} \Delta \mathbf{x}'(t_p) \mathbf{F} \Delta \mathbf{x}(t_p) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_p} \left(\Delta \mathbf{x}'(t) \mathbf{Q} \Delta \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}_F'(t) \mathbf{R} \mathbf{u}_F(t) \right) dt. \quad (4.34)$$

Die Gütefunktion bestraft sowohl den quadratischen Trajektorienfolgefehler als auch den benötigten Stellaufwand. Es wird somit sichergestellt, dass der Trajektorienfolgefehler gering bleibt, ohne dabei übermäßig große Stelleingriffe zu verwenden. Die Gewichtungsmatrizen \mathbf{F} und \mathbf{Q} sind positiv semidefinit und die Gewichtungsmatrix \mathbf{R} positiv definit zu wählen. Die Kosten werden bis zum Erreichen von $t_p = t_0 + T_p$ gewichtet, wobei T_p der Prädiktionshorizont ist. Die Gewichtungsmatrizen wurden zeitinvariant gewählt. Prinzipiell können diese jedoch auch zeitvariant sein. Dies kann zum Beispiel dann sinnvoll sein, wenn bei der Aktivierung der Regelung ein großer Anfangsfehler vorliegt. In diesem Fall können die Elemente der Gewichtungsmatrizen zu Beginn kleiner gewählt werden, um große Stelleingriffe zu vermeiden. In dieser Arbeit wird jedoch davon ausgegangen, dass der Trajektorienfolgefehler stets gering ist und zeitvariante Gewichtungsmatrizen

Q und F somit keinen Vorteil bringen. Bildet man die Hamiltonfunktion für das Gütefunktional (4.34) und stellt die Optimalitätsbedingungen sowie die Transversalitätsbedingungen auf, so erhält man das eindeutige Regelgesetz

$$\mathbf{u}_F(t) = -\mathbf{\Gamma}(t)\Delta\mathbf{x}(t) = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}'(t)\mathbf{P}(t)\Delta\mathbf{x}(t) \quad (4.35)$$

mit der zeitvarianten Rückführverstärkung $\mathbf{\Gamma}(t)$. Die Matrix $\mathbf{P}(t)$ ist die Lösung der zeitvarianten Matrix-Riccati-Differentialgleichung

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = -\mathbf{P}(t)\mathbf{A}(t) - \mathbf{A}'(t)\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}'(t)\mathbf{P}(t) - \mathbf{Q} \quad (4.36a)$$

$$\mathbf{P}(t_p) = \mathbf{F}. \quad (4.36b)$$

Zur Lösung der Riccati-Differentialgleichung benötigt man einen Anfangswert $\mathbf{P}(t_0)$. Dieser ist unbekannt. Was jedoch bekannt ist, ist der Wert am Ende des Prädiktionshorizonts in (4.36b). Mit dessen Hilfe kann die Lösung der Differentialgleichung rückwärts in der Zeit über eine numerische Integration bestimmt werden. Eine Übersicht der Berechnung des Rückführvektors wird in Bild 4.9 gezeigt. Setzt man die nichtlineare Vorsteuerung und die zeitvariante Riccati-Regelung in die

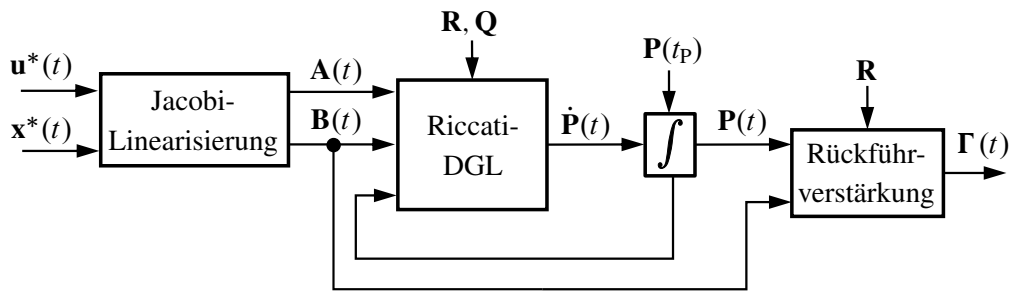


Bild 4.9: Schematische Darstellung der Berechnung des zeitvarianten Riccati-Reglers

in Abschnitt 4.1.4 vorgestellte Struktur mit zwei Freiheitsgraden ein, so ergibt sich das in Bild 4.10 dargestellte Gesamtkonzept.

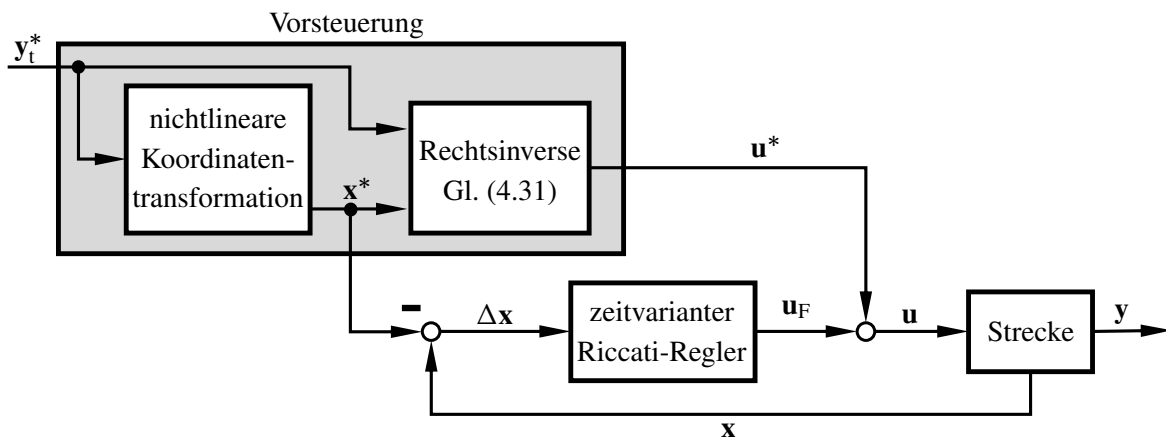


Bild 4.10: Struktur mit zwei Freiheitsgraden mit nichtlinearer Vorsteuerung und zeitvarianter Riccati-Regelung

Wahl der Parameter

Die Gewichtungsmatrizen werden als Diagonalmatrizen gewählt:

$$\mathbf{Q} = \text{diag}(\gamma_d, \gamma_{\psi_t}, \gamma_{\dot{\psi}}, 0, \gamma_v, 0, 0, 0, 0) \quad (4.37a)$$

$$\mathbf{R} = \text{diag}(\gamma_{\delta_c}, \gamma_{F_{x,c}}). \quad (4.37b)$$

Dies hat den Vorteil, dass jeder Gewichtungsfaktor $\gamma_{(\cdot)}$ genau einen der Systemzustände bestraft. Die Auswirkung eines Gewichtungsfaktors ist dadurch klar verständlich. Die Gewichtung des Trajektorienfolgefehlers Δv bzw. Δd sowie der Stellgrößen δ_c und $F_{x,c}$ stellt sicher, dass der Regler mit möglichst geringem Stellaufwand der Trajektorie exakt folgt. Die Zustände ψ_t und $\dot{\psi}$ wurden in Abschnitt 4.2 als interne Dynamik identifiziert. Das heißt, es ist dem Fahrzeug prinzipiell möglich, Drehbewegungen um die Hochachse auszuführen, die den Ausgang nicht direkt beeinflussen. Um solche Bewegungen zu vermeiden, wird auch die Abweichung dieser beiden Zustände von ihrem Sollwert bestraft. Der durchschnittliche Wert der Längskraft liegt im Bereich von 10^3 N, wohingegen der durchschnittliche Lenkwinkel im Bereich von 10^{-1} rad liegt. Dieser Größenunterschied verstärkt sich noch dadurch, dass stets der quadratische Fehler bestraft wird. Um eine ausgewogene Bestrafung der Stellgrößen zu erhalten, muss der Gewichtungsfaktor für die Bestrafung von Lenkbewegungen um den entsprechenden Faktor größer gewählt werden als der Gewichtungsfaktor für die Bestrafung der Längskraft. Dasselbe gilt für die Gewichtungsfaktoren der Zustände. Um eine Skalierung der Gewichtungsfaktoren zu umgehen, kann das System (4.33) vorab normiert werden, wodurch alle Zustände und Stellgrößen die gleiche Größenordnung haben.

Störgrößenbehandlung

Analog zur Störgrößenbehandlung in Abschnitt 4.3, muss auch der zeitvariante Riccati-Regler erweitert werden, um den Trajektorienfolgefehler bei einer stationären Fahrt vollständig auszuregeln. Hierzu wird das vollständige Fahrzeugmodell um zwei Zustände erweitert

$$\mathbf{x}_{\text{erw}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ e_v \\ e_d \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

mit

$$\dot{e}_v(t) = \Delta v(t) = v^*(t) - v(t) \quad (4.39a)$$

$$\dot{e}_d(t) = \Delta d(t) = d^*(t) - d(t). \quad (4.39b)$$

Die beiden neuen Zustände e_v und e_d beschreiben somit das Integral über den jeweiligen Trajektorienfolgefehler. Der Riccati-Regler erhält hierdurch einen I-Anteil, wodurch er stationäre Genauigkeit erreicht.

Zyklische Neuberechnung der zeitvarianten Regelung

Der zeitvariante Riccati-Regler ist immer nur so lange gültig wie die Trajektorie, um die das vollständige Fahrzeugmodell linearisiert wurde. Da diese zyklisch neu berechnet wird, muss auch die zeitvariante Rückführverstärkung des Riccati-Reglers zyklisch aktualisiert werden. Dieses Vorgehen ist in Bild 4.11 dargestellt. Zum Zeitpunkt t_0 wird eine neue Trajektorie berechnet und

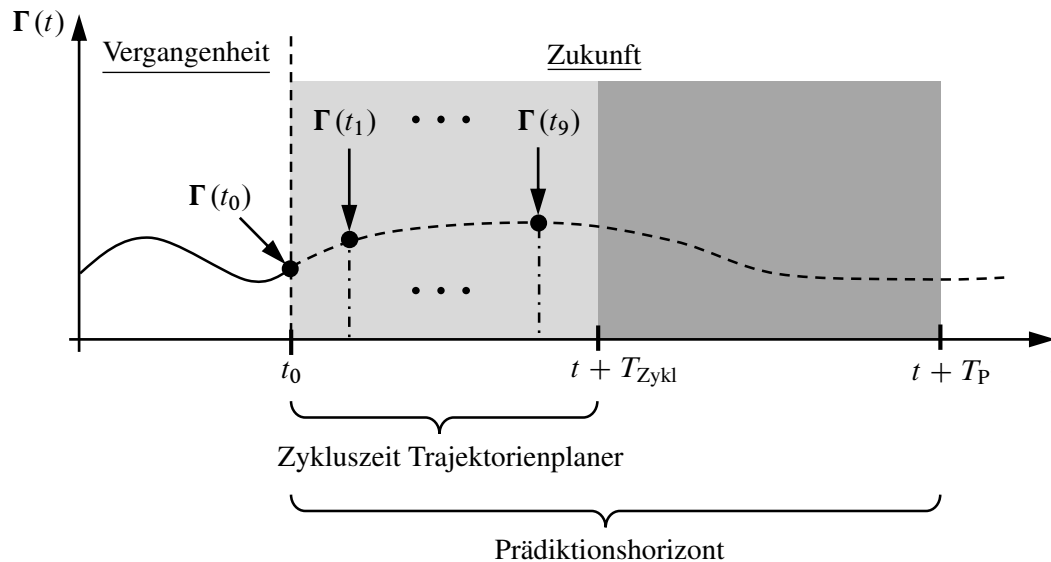


Bild 4.11: Schematische Darstellung der Neuberechnung und Anwendung der zeitvarianten Rückführverstärkung. Vereinfachend wird nur der Verlauf eines Elements der Rückführverstärkung dargestellt.

somit auch die zeitvariante Rückführverstärkung aktualisiert. Die Rückführverstärkung wird bis zum Ende des gewählten Prädiktionshorizonts berechnet. Die aktuelle Rückführverstärkung wird jedoch nur bis zum Ablauf der Zykluszeit des Trajektorienplaners angewendet. Die Fahrzeugführung hat eine um den Faktor zehn schnellere Zykluszeit als der Trajektorienplaner (vgl. 2.1), d. h. es werden nur die ersten zehn Rückführverstärkungen angewendet. Für die Echtzeit-Berechnung des zeitvarianten Riccati-Reglers steht nur eine sehr begrenzte Rechenzeit zur Verfügung, da der Riccati-Regler zusammen mit dem Trajektorienplaner innerhalb von 100 ms berechnet werden muss. Der ausschlaggebende Faktor für die benötigte Rechenzeit ist der Prädiktionshorizont T_P . Um für diesen eine sinnvolle Länge abzuschätzen, wurden für ein Fahrstreifenwechselmanöver verschiedene Prädiktionshorizonte betrachtet. Für die Bestimmung der Güte der berechneten Parameter der Rückführverstärkungen wird ein Referenzwert benötigt. Als Referenzwert dient ein Prädiktionshorizont, der sich über die gesamte Länge des Fahrstreifenwechselmanövers erstreckt. Die Ergebnisse sind in Bild 4.12 zu sehen. Diese stellen die mittlere Abweichung gegenüber dem Referenzwert aufsummiert über das gesamte Manöver dar. Bereits bei einem Prädiktionshorizont von zwei Sekunden stimmt die Rückführverstärkung schon nahezu mit der Referenz überein. Bei einem Prädiktionshorizont von drei Sekunden ist nur noch bei wenigen Elementen der Rückführverstärkung ein Unterschied erkennbar. Ein Prädiktionshorizont von maximal drei Sekunden ist daher ausreichend.

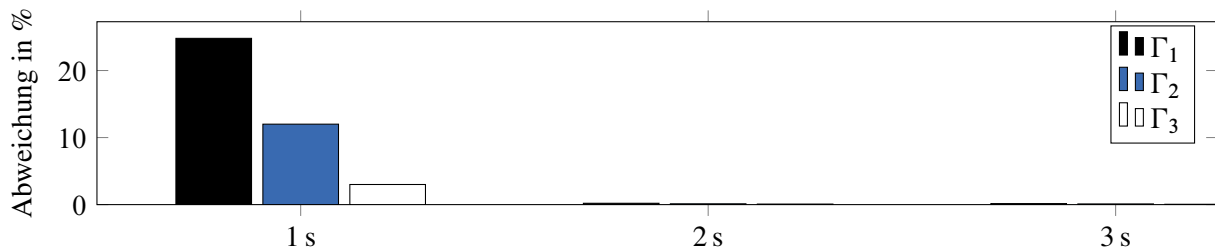


Bild 4.12: Mittlere relative Abweichung für drei beispielhafte Elemente der Rückführverstärkung für verschiedene Prädiktionshorizonte eines Fahrstreifenwechselmanövers

4.5 Vergleich der Konzepte

Die beiden entwickelten Konzepte zur Fahrzeugführung sind einerseits sehr unterschiedlich, weisen andererseits jedoch auch einige Gemeinsamkeiten auf. Diese Gemeinsamkeiten und Unterschiede werden zu Beginn dieses Abschnitts in einem konzeptionellen Vergleich herausgearbeitet. Anschließend erfolgt eine Bewertung der beiden Konzepte in einer realitätsnahen Simulationsumgebung anhand eines anspruchsvollen Autobahnszenarios.

4.5.1 Konzeptioneller Vergleich

Das für die Fahrzeugmodellierung verwendete vollständige Fahrzeugmodell ist ein zeitvariantes und nichtlineares Mehrgrößensystem. Die Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung wird direkt auf dieses angewandt, wodurch sich ein nichtlinearer zeitvarianter Regler ergibt. Durch direkte Verwendung des umfassenden Modells muss auch dessen volle Komplexität im Entwurf berücksichtigt werden. Hierdurch steigt der Aufwand für den Entwurf und speziell für die Rückverfolgbarkeit bei Fehlern, die während der Implementierung auftreten. Ein Beispiel hierfür ist die Berechnung der höchsten benötigten Lie-Ableitung für den zweiten Ausgang (vgl. (4.5)). Diese wird so komplex, dass sie nicht mehr direkt von Matlab verarbeitet werden kann. Demgegenüber steht der Entwurf des linearen zeitvarianten Riccati-Reglers. Dieser erfolgt an einem linearisierten Modell mit geringer Komplexität. Aufgrund der benötigten nichtlinearen Koordinatentransformation erhält aber auch dieser Ansatz eine ähnliche Komplexität wie die Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung. Beide Konzepte weisen eine Struktur mit zwei Freiheitsgraden auf, auch wenn diese sehr unterschiedlich ausgeprägt ist. Die hierbei vorzufindende Aufteilung in Vorsteuerung und Folgeregler wird auch im Folgenden für den weiteren Vergleich der beiden Konzepte verwendet.

Vorsteuerung

Die Vorsteuerung der Exakten Eingangs-Ausgangs-Linearisierung besteht lediglich aus einem Sollwert (vgl. Gleichung (4.21)). Die Vorsteuerung basiert auf der Annahme, dass die Rückführung (4.18) die Nichtlinearen des Systems vollständig kompensiert und dadurch, dass in (4.19) dargestellte, lineare Ein-/Ausgangsverhalten gilt. Die Leistungsfähigkeit der Vorsteuerung hängt auf-

grund dessen maßgeblich von der Qualität der aktuellen Messung der Systemzustände ab. Sind diese mit Messfehlern oder Messrauschen behaftet, besteht die Möglichkeit, dass das System nicht korrekt invertiert wird. Ist dies der Fall, gilt die der Vorsteuerung zugrundeliegende Annahme nicht und die Vorsteuerung kann das gewünschte Systemverhalten nicht erzielen. Bei der nichtlinearen Vorsteuerung, die in Kombination mit der linearen zeitvarianten Regelung verwendet wird, basiert die Vorsteuerung hingegen nur auf Sollwerten (vgl. Gleichung (4.31)). Sie ist dadurch unabhängig von Messwerten und daher insgesamt robuster. Voraussetzung hierbei ist natürlich, dass der Trajektorienfolgefehler klein ist.

Folgeregler

Bei beiden Konzepten erfolgt der eigentliche Entwurf des Folgereglers für ein lineares Modell. Bei der Exakten Eingangs-Ausgangs-Linearisierung erhält man dieses durch die Kompensation der Nichtlinearitäten. Das erhaltene lineare zeitinvariante Modell beschreibt anschließend lediglich das Ein-Ausgangsverhalten, d. h. die interne Dynamik wird nicht abgebildet. Bei dem Entwurf für den zeitvarianten Riccati-Regler hingegen erfolgt eine Jaccobi-Linearisierung entlang der Trajektorie für das vollständige Modell. Das resultierende lineare Modell ist in diesem Fall zeitvariant und beschreibt die Fehlerdynamik des Systems. Ein weiterer Unterschied ist, dass die bei der Exakten Eingangs-Ausgangs-Linearisierung verwendete Kompensation zusätzlich eine Entkopplung der Ein- und Ausgänge herbeiführt. Es ist dadurch möglich, die Dynamik der beiden Ausgänge unabhängig voneinander einzustellen. Für den Entwurf kann ein zeitinvarianter Eingrößenregler verwendet werden. Dies ist die einfachste Klasse von Reglern. Nachteil der Exakten Eingangs-Ausgangs-Linearisierung ist, dass die interne Dynamik stabil sein muss und nicht beeinflusst werden kann. Es ist dadurch möglich, dass z. B. Gierbewegungen auftreten, die das Folgen der Trajektorie nicht beeinflussen, aber dennoch für Fahrzeuginsassen wahrnehmbar sind. Die größte Schwäche der Exakten Eingangs-Ausgangs-Linearisierung ist die Abhängigkeit von der Inversion des Systems. Hierdurch ist es möglich, dass durch Messfehler das System nicht korrekt invertiert wird. Im Regelkreis verbleiben dann Nichtlinearitäten, die mit dem linearen Regler nicht ausgeregelt werden können. Im Gegensatz dazu ist der zeitvariante Riccati-Regler ein Mehrgrößenregler, der beide Ausgänge gleichzeitig regelt. Es ist dadurch nicht möglich die Wunschedynamik der beiden Ausgänge unabhängig voneinander einzustellen. Dies führt zu einer Erhöhung des Parametrierungsaufwands. Ein Vorteil des Riccati-Reglers ist, dass er das vollständige Fahrzeugmodell verwendet und keine interne Dynamik existiert. Es ist somit möglich gezielt Einfluss auf das gesamte System zu nehmen.

4.5.2 Vergleich auf Basis von Simulationsergebnissen

Zum Vergleich der beiden Konzepte zur Fahrzeugführung wurden diese in eine CarMaker¹ Simulationsumgebung integriert. CarMaker stellt sowohl eine hoch genaue Modellierung des Fahrzeugs als auch der Umgebung (Straße, Verkehrszeichen, Verkehrsteilnehmer, etc.) zur Verfügung.

¹<https://ipg-automotive.com/de/>

Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit der Fahrzeugführungskonzepte wird eine anspruchsvolle Autobahnstrecke gewählt und auf dieser ein für eine Autobahnfahrt typisches Überholmanöver ausgeführt. Die Autobahnstrecke besteht aus einer rechts drehenden Klothoide mit Anfangsradius von 2500 m, der sich langsam auf 2000 m zusammenzieht. Zusätzlich weist die Autobahnstrecke eine Steigung auf. Diese wird sprungförmig in 1 %-Stufen von 0 % auf 5 % erhöht, wie in Bild 4.13 dargestellt. Das Szenario ist in zwei Abschnitte eingeteilt. Im ersten Abschnitt hält das

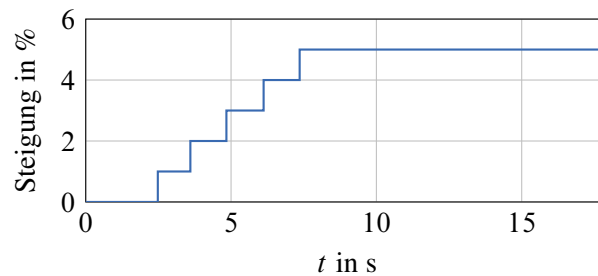


Bild 4.13: Sprungförmiger Steigungsanstieg der Autobahnstrecke

Ego-Fahrzeug den aktuellen Fahrstreifen und fährt mit konstanter Geschwindigkeit von 25 m/s (90 km/h). Die beschriebene Steigungsänderung wirkt als unbekannte Störung auf das System und muss durch die Fahrzeugführung kompensiert werden. Nachdem die maximale Steigung erreicht ist, beginnt im zweiten Abschnitt das Überholmanöver. Während des Überholmanövers erhöht das Ego-Fahrzeug seine ursprüngliche Geschwindigkeit auf 31 m/s (110 km/h). Wir führen die folgenden Abkürzungen ein: Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung (EEAL) und Nichtlineare Vorsteuerung mit zeitvarianter Regelung (NVZR). Der Soll- und Istverlauf der beiden Ausgänge sowie die Trajektorienfolgefehler sind in Bild 4.14 zu sehen. Es ist klar zu erkennen, dass beide Konzepte zur Fahrzeugführung der Trajektorie sehr genau folgen können. Die maximalen Trajektorienfolgefehler liegen deutlich unter den in Abschnitt 4.1.2 festgelegten Grenzwerten. Beide Konzepte sind in der Lage, die sprungförmige Störung im ersten Abschnitt schnell auszuregeln. Die NVZR zeigt dabei ein etwas besseres Folgeverhalten bzgl. der Geschwindigkeitsvorgabe. Ein Grund hierfür liegt in der Vorsteuerung, die in Bild 4.15 zu sehen ist. Die Kompensation der Nichtlinearitäten für die EEAL wird anhand von (4.18) berechnet. Der Verlauf der Vorsteuerung der EEAL weist stets zu Beginn der sich sprungförmig ändernden Störung negative Werte auf. Sie wirkt der Störung nicht entgegen, sondern verstärkt diese noch. Die Ursache dafür ist, dass die Störung nicht im Fahrzeugmodell (2.20) enthalten ist, wodurch eine korrekte Systeminversion durch die Rückführung (4.18) verhindert wird. In Abschnitt 4.3.2 wurde bereits festgestellt, dass der relative Grad der Störung kleiner ist als der relative Grad der Eingänge. Dementsprechend wirkt nicht primär die Störung, sondern eine Ableitung der Störung auf die Eingänge. Aus diesem Grund tritt dieser Effekt nur bei einer Änderung und nicht bei einer konstanten Störung auf. Während des Überholvorgangs im zweiten Abschnitt zeigt die EEAL hingegen ein besseres Querführungsverhalten. Auch hier spielt die Vorsteuerung eine Rolle. Bei der NVZR weist diese deutlich geringere Werte auf. Dieser deutliche Unterschied der beiden Vorsteuerungen kann nur entstehen, wenn mindestens ein Sollverlauf der Zustände \mathbf{x}^* nicht mit seinem Istverlauf \mathbf{x} übereinstimmt. Bei Vergleich der Zustandsverläufe kann festgestellt werden, dass dies nur auf den

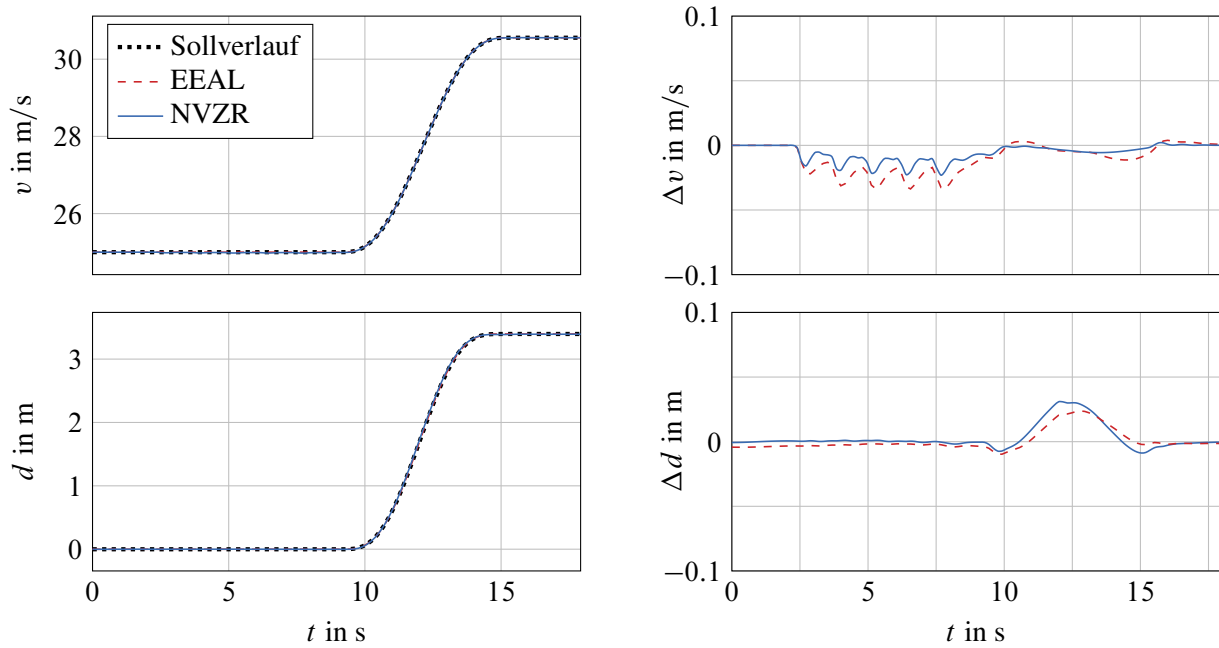


Bild 4.14: Ist- und Sollverlauf der beiden Ausgangsgrößen (links) und Verlauf des Trajektorienfolgefehlers (rechts) für das beschriebene Autobahnszenario

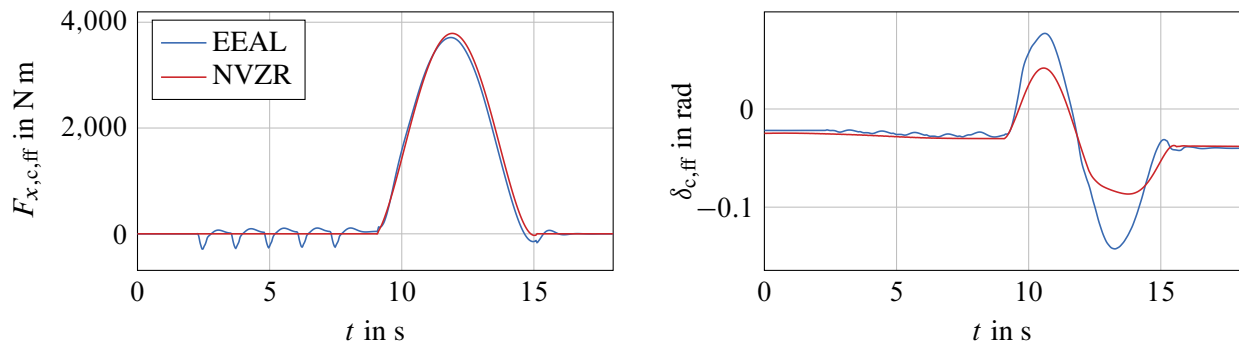


Bild 4.15: Vergleich der EEAL und der Vorsteuerung der NVZR. Für die EEAL ist das Produkt aus Vorsteuerung (4.21) und Kompensation der Nichtlinearitäten (4.18) dargestellt. Dies ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit und verdeutlicht gleichzeitig die Abhängigkeit der Vorsteuerung der EEAL von der Kompensation (4.18).

Schwimmwinkel zutrifft. Dies ist wenig verwunderlich, da die Dynamik des Schwimmwinkels nur schwer exakt vom Modell abgebildet werden kann.

5 Prototypische Umsetzung des entwickelten Gesamtkonzepts

Ein wesentlicher Schwerpunkt dieser Arbeit war die Umsetzung und Erprobung des Trajektorienplaners sowie der beiden Konzepte zur Fahrzeugführung in einem Versuchsfahrzeug. Zusätzlich wurden die entwickelten Komponenten auch in das in Bild 1.2 dargestellte Ko-HAF-Gesamtsystem integriert und erfolgreich im Rahmen der Ko-HAF-Abschlusspräsentation vorgeführt. Aufgrund einer fehlenden Straßenfreigabe erfolgten sämtliche Tests im Opel Test Center in Dudenhofen. Die verwendete Teststrecke ist eine lange und nahezu ebene Gerade mit drei Fahrstreifen, die am Anfang einen für Autobahnen typischen Beschleunigungsstreifen und am Ende einen entsprechende Verzögerungsstreifen besitzt. Im Folgenden wird zunächst kurz das verwendete Versuchsfahrzeug vorgestellt und anschließend die Leistungsfähigkeit des Trajektorienplaners und der beiden Konzepte zur Fahrzeugführung anhand geeigneter Szenarien aufgezeigt und diskutiert

5.1 Versuchsfahrzeug

Als Versuchsfahrzeug dient ein Opel Insignia Sports Tourer mit Automatikgetriebe (siehe Bild 5.1). Zur Erfassung anderer Verkehrsteilnehmer besitzt dieser sowohl an der Front als auch am

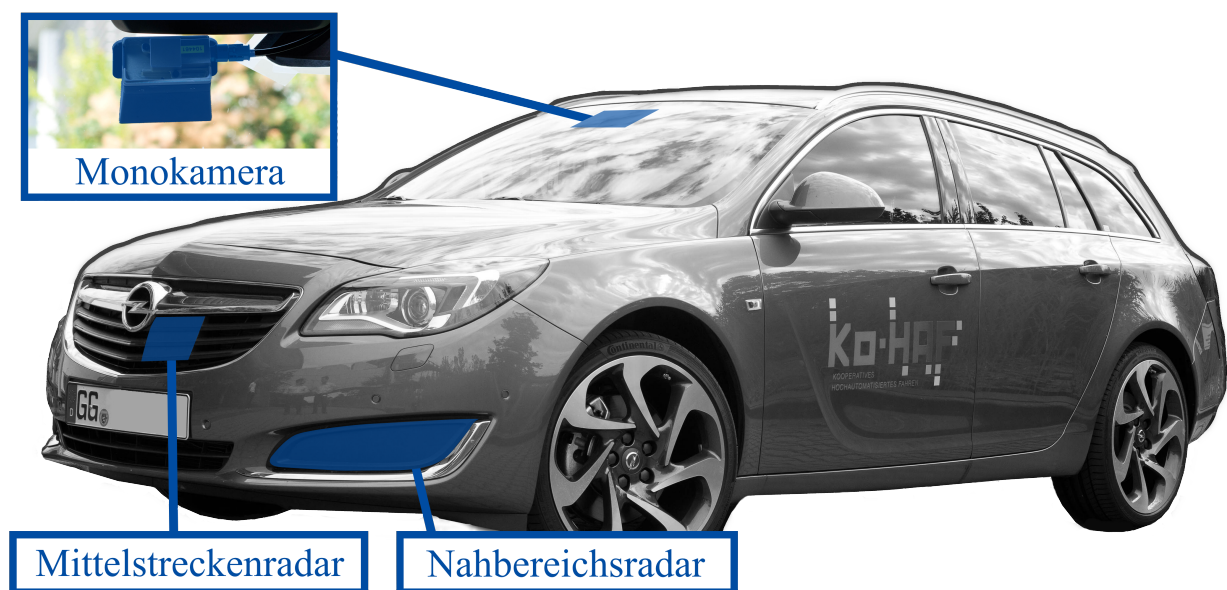


Bild 5.1: Versuchsfahrzeug und verwendete Sensorik zur Erfassung des Umfelds

Heck des Fahrzeugs jeweils zwei seitliche Nahbereichsradare und einen zentralen Mittelstrecken-

radar. Die Informationen der Radarsensoren werden mit den erfassten Daten einer Monokamera fusioniert. Die Monokamera liefert zusätzlich noch Fahrstreifenmarkierungen und die daraus ableitbaren Größen, wie z. B. die Position innerhalb des Fahrstreifens oder den fahrstreifenrelativen Gierwinkel. Für die Bestimmung des Schwimmwinkels wird ein zusätzlicher Sensor verbaut¹. Der Sensor schätzt den Schwimmwinkel mit Hilfe eines nichtlinearen Beobachters, in den Messungen aus einem Trägheitsnavigationssystem sowie aus einem GPS-Empfänger eingehen. Die Trajektorienplanung, die Konzepte zur Fahrzeugführung sowie der unterlagerte Lenkradwinkelregler werden auf einer dSPACE AutoBox mit einem DS1007-Prozessorboard berechnet. Die AutoBox kommuniziert über die CAN- und Ethernetschnittstellen mit den anderen Steuergeräten und Computern im Fahrzeug.

5.2 Experimentelle Validierung des Gesamtkonzepts

Das Ziel der experimentellen Validierung ist es, sowohl die Leistungsfähigkeit des Trajektorienplaners als auch der beiden Konzepte zur Fahrzeugführung zu demonstrieren. Dies geschieht anhand der drei folgenden für eine Autobahnfahrt typischen Szenarien:

- **Szenario 1:** Fehlgeschlagene Auffahrt auf die Autobahn aufgrund von dichtem Verkehr auf dem rechten Fahrstreifen,
- **Szenario 2:** Auffahren mit hoher Geschwindigkeit auf ein deutlich langsamer fahrendes Fahrzeug und anschließende Folgefahrt,
- **Szenario 3:** Überholmanöver, d. h. Fahrstreifenwechsel mit gleichzeitiger Erhöhung der Geschwindigkeit.

Im Anhang A.3 sind zwei weitere Szenarien abgebildet. Diese stellen keine typischen Autobahnszenarien dar, zeigen dafür aber sehr schön die Leistungsfähigkeit der Fahrzeugführung in Längsrichtung nahe der Beschleunigungsgrenzen. Die experimentelle Validierung erfolgt anhand der Ergebnisse einer einzelnen Messung. Alle Szenarien wurden mehrfach getestet, und die Resultate waren stets reproduzierbar.

5.2.1 Szenario 1: Fehlgeschlagene Auffahrt

Szenario 1 beschreibt eine typische Auffahrt auf die Autobahn bei dichtem Verkehr. Der rechte Fahrstreifen der Autobahn ist durch viele Verkehrsteilnehmer belegt und die vorhandenen Lücken sind für einen Fahrstreifenwechsellvorgang unter Einhaltung der Sicherheitsabstände zu klein (vgl. Bild 5.2). Im Gegensatz zu einem menschlichen Fahrer ist es dem entwickelten Trajektorienplaner nicht möglich, Sicherheitsabstände zu unterschreiten und dadurch eine Kooperation

¹ADMA-G-EntryLevel, GeneSys Elektronik GmbH

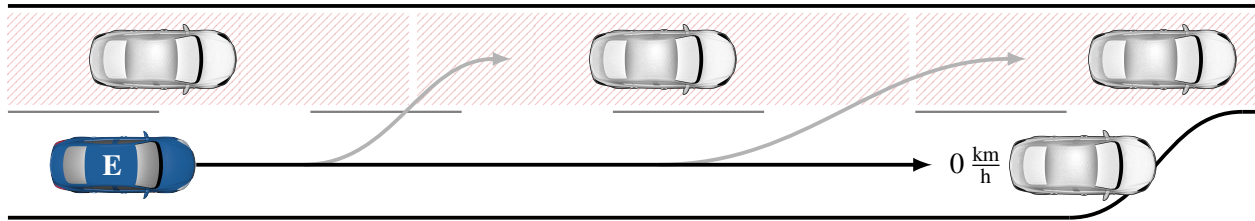


Bild 5.2: Darstellung von Szenario 1: Aufgrund des dichten Verkehrs ist eine Auffahrt auf die Autobahn nicht möglich, weshalb das Fahrzeug auf dem Beschleunigungsstreifen in den Stillstand bremst.

der anderen Verkehrsteilnehmer zu erzwingen. Alle Trajektorien zum Fahrstreifenwechsel (in grau dargestellt) sind dadurch ungültig und das Einfädeln auf den rechten Fahrstreifen schlägt fehl. Aus diesem Grund plant der Stillstandsplaner zum spätestmöglichen Zeitpunkt eine Trajektorie, die das Fahrzeug genau hinter dem virtuellen Fahrzeug auf dem Einfädelstreifen zum Stehen bringt (vgl. Kapitel 3.5). Die Ergebnisse der Testfahrt sind in Bild 5.3 dargestellt. Die Messergebnisse sind aufgeteilt in zwei Spalten, wobei die linke Spalte die Messergebnisse des EEAL und die rechte Spalte die Messergebnisse des NVZR enthalten. Der Verlauf der Trajektorie ist für beide Messungen identisch. Die Verläufe in der obersten Reihe stellen die verbleibende Strecke der Auffahrt bzw. den Abstand zu dem virtuellen Fahrzeug am Ende des Beschleunigungsstreifens dar. Die geplante Stillstandstrajektorie bringt das Fahrzeug wie gewünscht genau am Ende des Fahrstreifens zum Stehen. Um die maximale Verzögerung über einen längeren Zeitraum halten zu können, besteht die Stillstandstrajektorie wie in Abschnitt 3.4.4 beschrieben aus drei Stufen. Dies sieht man sehr gut an dem Verlauf der Beschleunigung in der untersten Reihe der Messergebnisse. Gegen Ende des Manövers kann man im Beschleunigungsverlauf einen kleinen Knick beobachten. Dies tritt bei der Unterschreitung einer Geschwindigkeit von ca. 1 m/s auf. In diesem Bereich entsteht eine starke Wechselwirkung zwischen dem sogenannten “Standgas” und der Bremse, weshalb der Regler überbrückt wird. Anstelle des Reglers wird ein fester Verzögerungswert vorgegeben, der das Fahrzeug sicher in den Stand bremst. Während des gesamten Manövers können beide Konzepte zur Fahrzeugführung ein sehr gutes Folgeverhalten vorweisen. Der Trajektorienfolgefehler (siehe Bild 5.4) ist dabei stets innerhalb der festgelegten Grenzen und überschreitet diese erst nach Überbrückung des Reglers geringfügig ($< 1 \text{ m/s}$). Dies stellt in der Praxis aber kein Problem dar, da sich das Fahrzeug in diesem Bereich nur noch wenige Zentimeter bewegt.

5.2.2 Szenario 2: Folgefahrt

In diesem Szenario wird das Folgen eines vorausfahrenden Fahrzeugs in einer etwas überspitzten Weise nachgestellt. Das Ego-Fahrzeug nähert sich dabei mit einer hohen Geschwindigkeit von ca. 120 km/h einem langsameren vorausfahrenden Fahrzeug (ca. 70 km/h) und folgt diesem anschließend (s. Bild 5.5). Nach kurzer Zeit bremst das vorausfahrende Fahrzeug erst stark auf ca. 45 km/h ab, bevor es sich seiner Endgeschwindigkeit von 100 km/h annähert. Das vorausfahrende Fahrzeug wurde durch einen menschlichen Fahrer gesteuert, weshalb eine exakte Wiederholbarkeit dieses Szenarios nicht möglich ist. Aus diesem Grund sind die Messverläufe für EEAL und

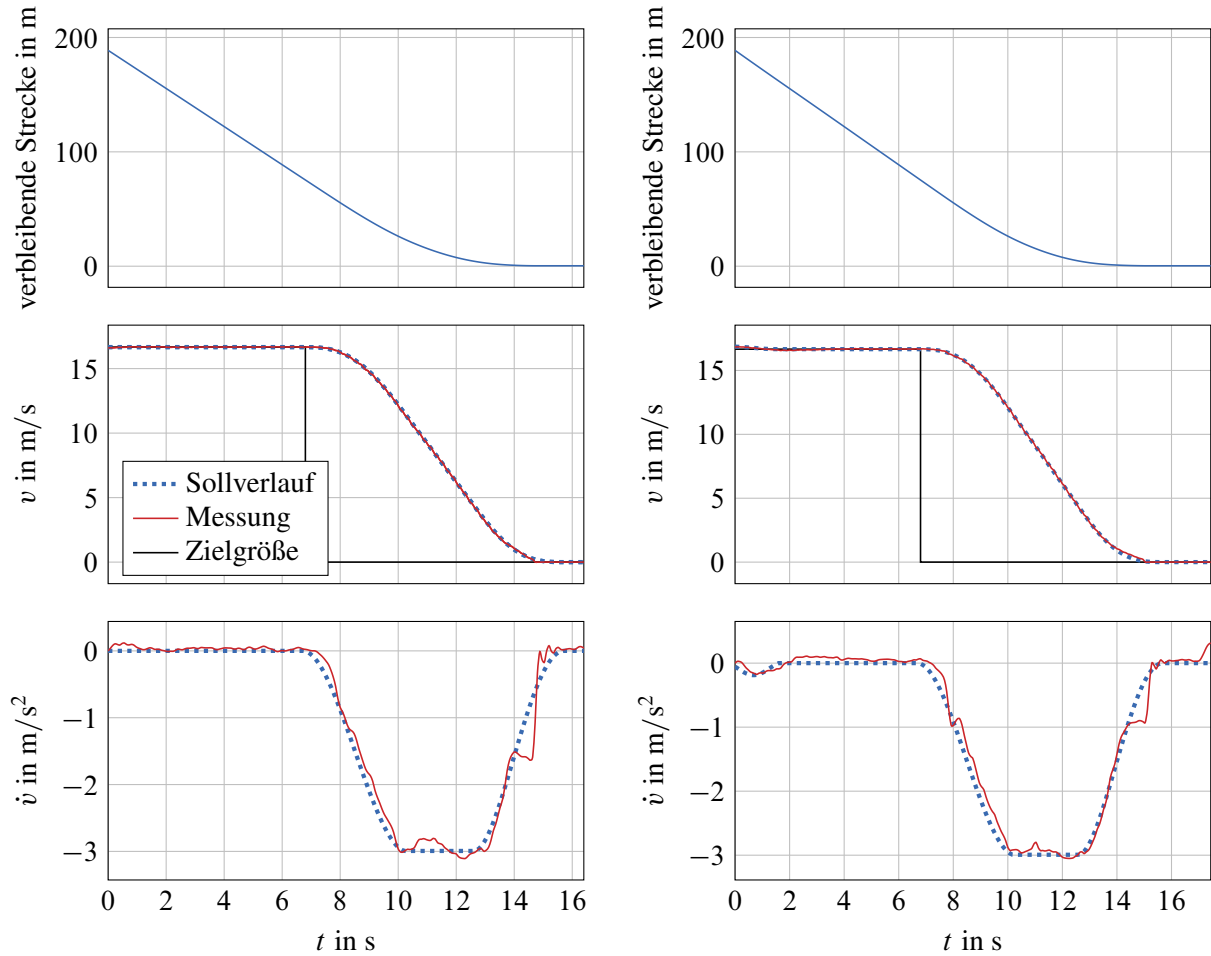


Bild 5.3: Messerergebnisse für Szenario 1: EEAL (links) und NVZR (rechts)

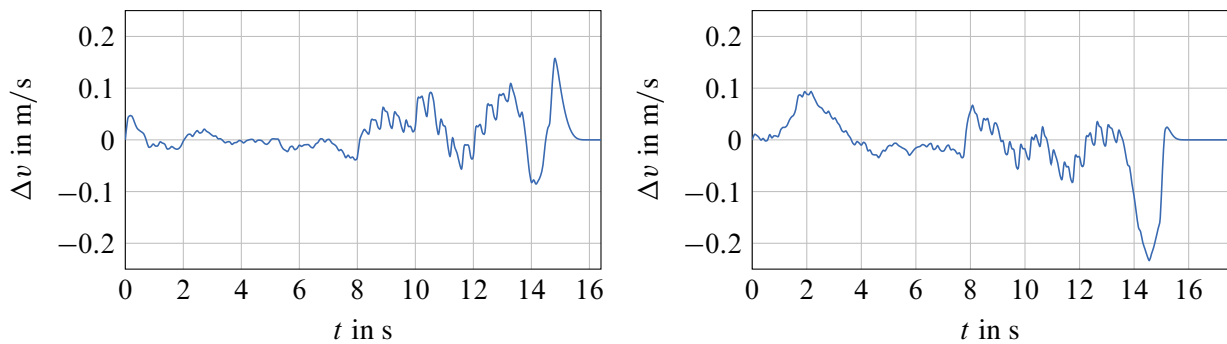


Bild 5.4: Trajektorienfolgefehler für Szenario 1: EEAL (links) und NVZR (rechts)

NVZR in Bild 5.6 leicht verschieden. Nach ca. 6 s reagiert das Ego-Fahrzeug auf das vorausfahrende Fahrzeug und beginnt diesem zu folgen. Hierfür muss das Ego-Fahrzeug zunächst sehr stark verzögern. Trotz dieser starken Verzögerung können beide Konzepte zur Fahrzeugführung der vorgegebenen Geschwindigkeitstrajektorie exakt folgen. Die passende Zielgröße für die Geschwindigkeit wählt der Trajektorienplaner anhand des Kostenfunktional (3.15) selbstständig aus der diskretisierten Lösungsmenge aus. Bei der Einhaltung des zeitlichen Sicherheitsabstandes sind kleinere Abweichungen zu beobachten. Diese lassen sich dadurch erklären, dass die verwendete

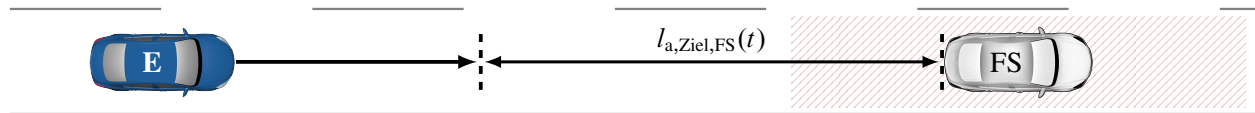


Bild 5.5: Darstellung von Szenario 2: Auffahren auf ein vorausfahrendes Fahrzeug mit anschließender Folgefahrt

Kostenfunktion neben der Abweichung vom gewünschten Sicherheitsabstand z. B. auch den Stel-
laufwand bestraft. Durch eine stärkere Gewichtung des Sicherheitsabstands ist es möglich, diese
Abweichungen vom gewünschten Abstand zum Vorderrmann zu verringern. Allerdings führt dies
auch zu einer erhöhten Anzahl an Stelleingriffen. Beim EEAL tritt bei ca. 55 s erst ein kurzer
Abfall und anschließend ein kurzes Überspringen im Beschleunigungsverlauf auf. Dies ist auf
einen von der Getriebesteuerung ungünstig gewählten Schaltzeitpunkt zurückzuführen. Trotz die-
ser Problematik weist der Trajektorienfolgefehler in Bild 5.7 nur einen kleinen Peak auf, der direkt
wieder ausgegelt wird. Beim NVZR ist ein kurzer Peak zu Beginn des Abbremsvorgangs bei ca.
6 s zu sehen.

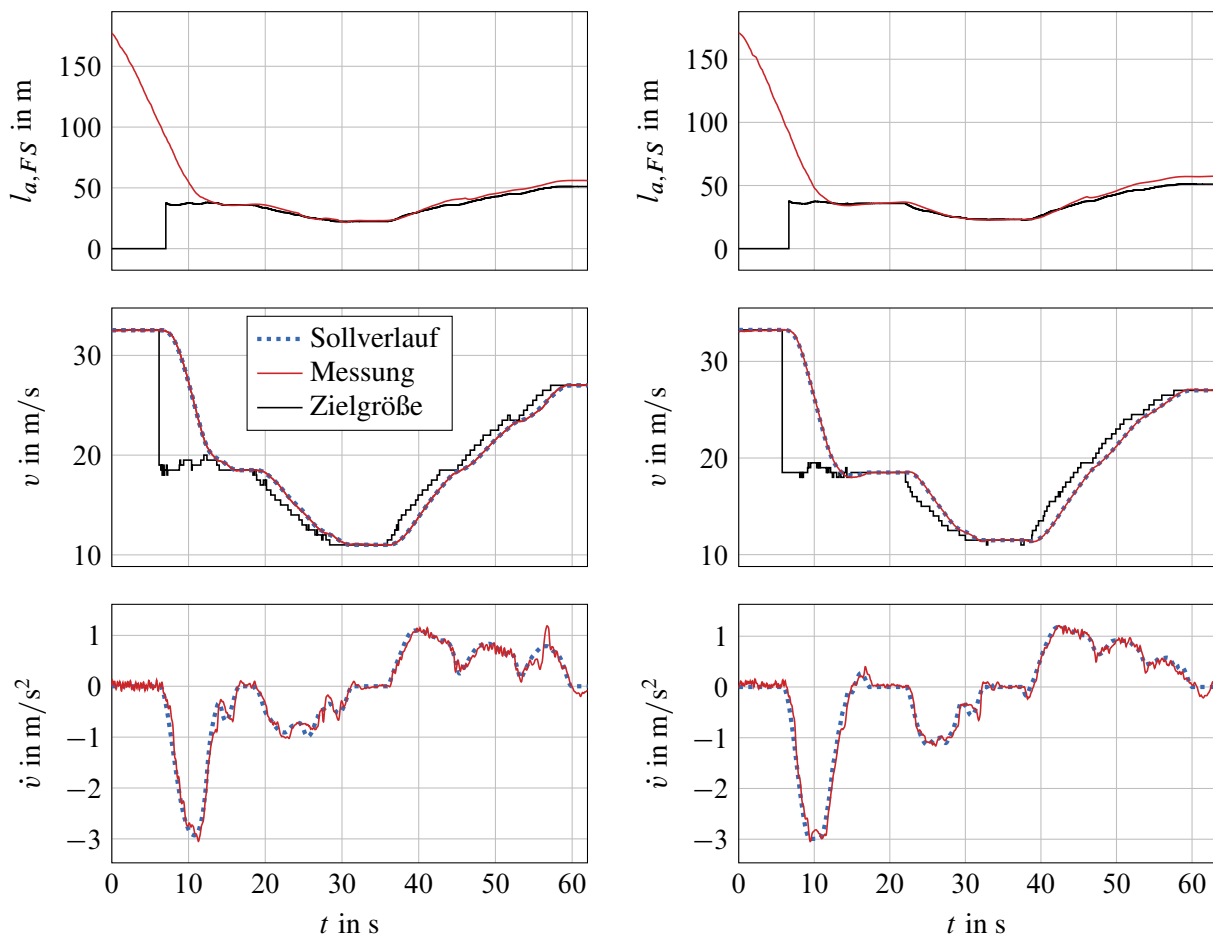


Bild 5.6: Messergebnisse für Szenario 2: EEAL (links) und NVZR (rechts)

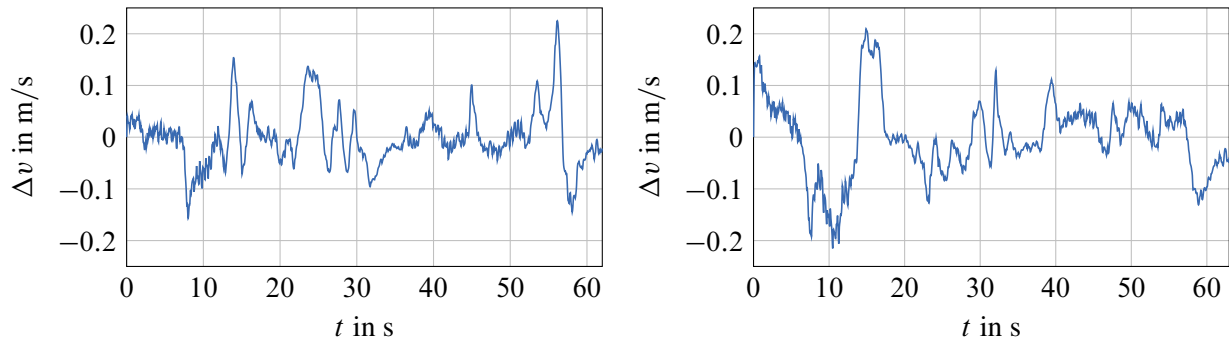


Bild 5.7: Trajektorienfolgefehler für Szenario 2: EEAL (links) und NVZR (rechts)

5.2.3 Szenario 3: Überholmanöver

Das dritte Szenario ist nahezu identisch mit dem Überholmanöver aus Abschnitt 4.5.2. Das Ego-Fahrzeug nähert sich einem langsamer fahrenden Fahrzeug. Die überlagerte Fahrstrategie fordert den Fahrstreifenwechsel frühzeitig an. Dadurch muss das Ego-Fahrzeug nicht erst abbremesen sondern kann das vorausfahrende Fahrzeug direkt überholen (siehe Bild 5.8). Um den Überholvor-

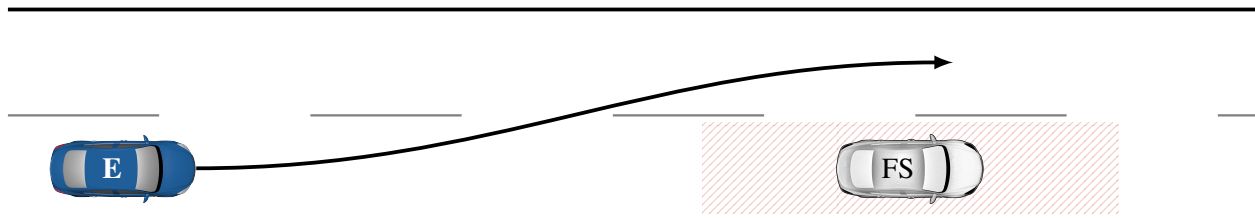


Bild 5.8: Darstellung von Szenario 3: Überholmanöver eines langsamer vorausfahrenden Fahrzeugs

gang möglichst schnell abzuschließen, erhöht das Ego-Fahrzeugs zusätzlich seine Geschwindigkeit um 5,6 m/s (20 km/h). Die Messergebnisse in Bild 5.9 zeigen, dass die beiden Konzepte in diesem Szenario der geplanten Trajektorie auch bei sehr hoher positiver Längsbeschleunigung exakt folgen können. Betrachtet man die Trajektorienfolgefehler in Bild 5.10, kann man feststellen, dass die Leistungsfähigkeit der Fahrzeugführungskonzepte wie bereits zuvor sehr ähnlich ist. Die Trajektorienfolgefehler bleiben wieder innerhalb der vorgegebenen Grenzen. Bei der Durchführung dieses Manövers zeigte sich eine Problematik beim Zusammenspiel mit dem Automatikgetriebe. Der schnelle Anstieg der benötigten Längskraft zur Erhöhung der Geschwindigkeit kann dazu führen, dass das Automatikgetriebe direkt zwei Schaltvorgänge nacheinander ausführt. Dadurch steht kurzzeitig kein Antriebsmoment zu Verfügung. Im Gegensatz zu Szenario 2 führt der doppelte Schaltvorgang hier dazu, dass der Trajektorienfolgefehler kurz deutlich über den vorgegebenen Grenzwert hinaus geht.

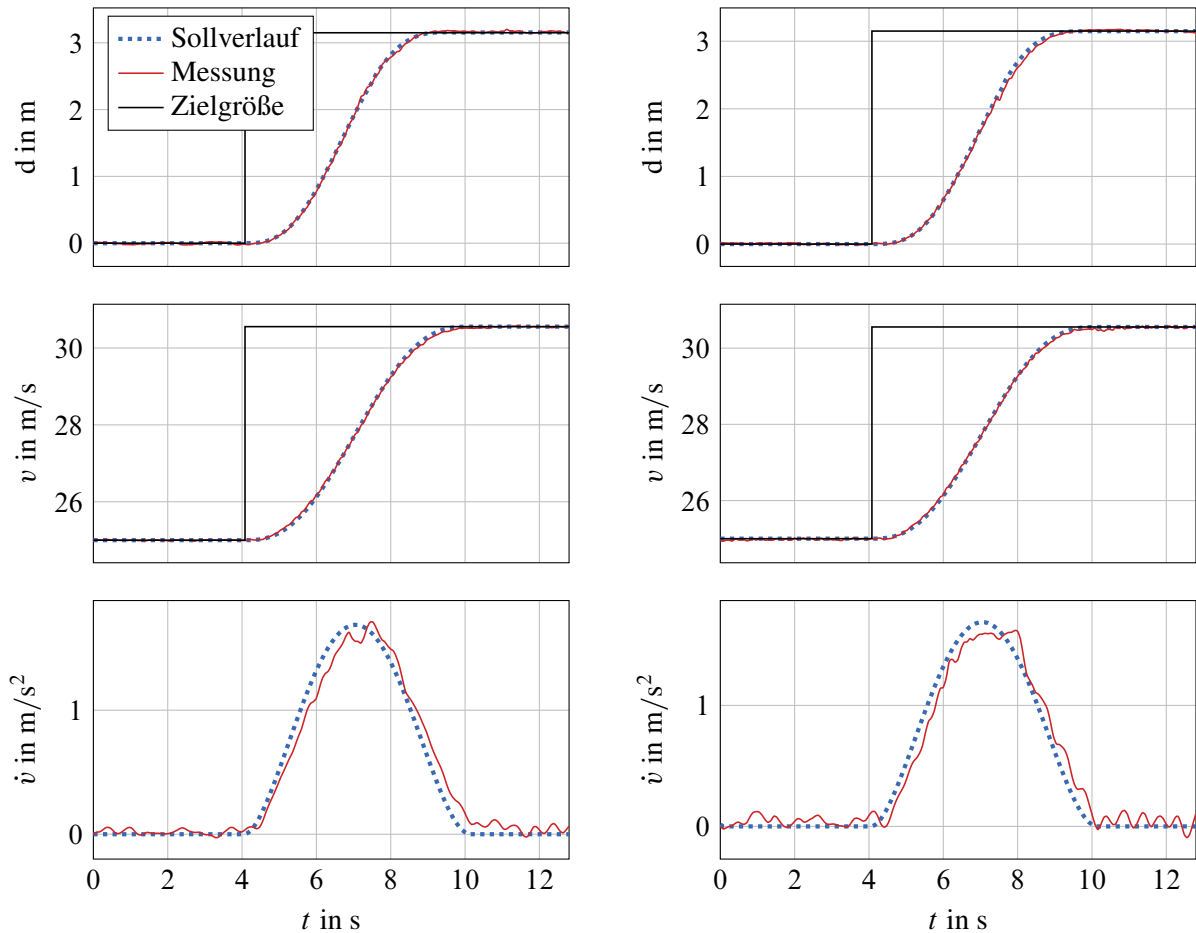


Bild 5.9: Messergebnisse für Szenario 3: EEAL (links) und NVZR (rechts)

5.3 Zusammenfassung der prototypischen Umsetzung

Es wurde die prototypische Umsetzung in einem Versuchsfahrzeug vorgestellt. Dabei wurden nahezu ausschließlich Sensoren verwendet, die bereits in aktuellen Serienfahrzeugen verbaut werden. Die einzige Ausnahme bildet der zusätzlich verbaute Sensor zur Bestimmung des Schwimmwinkels. Für diesen bestehen in der Literatur, z. B. Bechtloff [2018], bereits sehr leistungsstarke Ansätze, mit deren Hilfe der Schwimmwinkel zuverlässig anhand aktueller Seriensensorik geschätzt werden kann. Es ist aus diesem Grund möglich, das vorgestellte Gesamtkonzept in aktuellen Serienfahrzeugen ohne zusätzliche Nachrüstung umzusetzen.

Die Leistungsfähigkeit des entwickelten Gesamtkonzepts wurde anhand mehrerer für eine Autobahnfahrt typischer Szenarien dargestellt. Der Trajektorienplaner konnte für alle Szenarien stets eine komfortable und kollisionsfreie Trajektorie bereitstellen. Die dafür benötigte Rechenzeit ist dabei so gering, dass es auch prinzipiell möglich ist, einen Fahrstreifenwechsel in mehrere Lücken gleichzeitig zu planen. Auch die Fahrzeugführung war stets in der Lage, der geplanten Trajektorie exakt zu folgen. Beide Konzepte zur Fahrzeugführung zeigten vergleichbare Ergebnisse. Außerdem wurde festgestellt, dass die im Gesamtkonzept nicht berücksichtigten Schaltvorgänge des

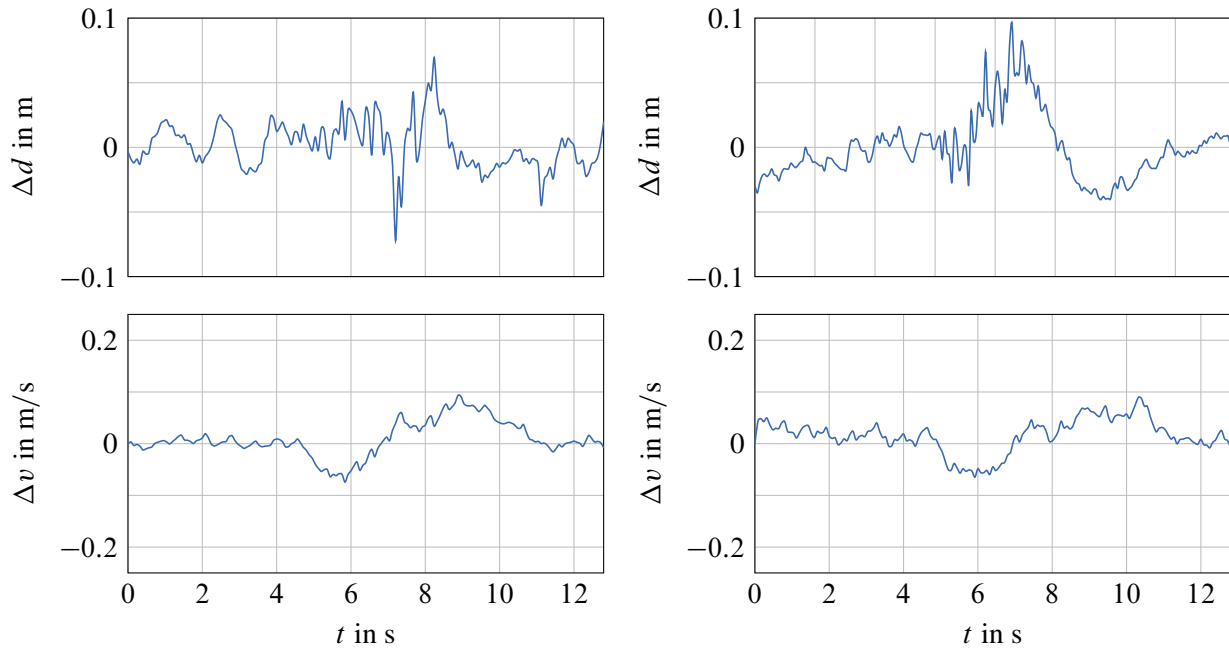


Bild 5.10: Trajektorienfolgefehler für Szenario 3: EEAL (links) und NVZR (rechts)

Automatikgetriebes in Ausnahmefällen zu einem kurzzeitig erhöhten Trajektorienfolgefehler führen können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Um die Verkehrssicherheit zu erhöhen, werden aktuell Assistenzsysteme entwickelt, die sowohl die Längs- als auch die Querverführung des Fahrzeugs übernehmen. Diese Systeme sind in die drei Handlungsebenen Wahrnehmung, Planung und Ausführung unterteilt (vgl. Bild 1.3). In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen dieser Arbeit zunächst ein Konzept für eine Komponente der Planungsebene, den Trajektorienplaner, entwickelt. Um sicherzustellen, dass das Fahrzeug der geplanten Trajektorie folgt, wurden anschließend zwei Konzepte für die Ausführungsebene, die Fahrzeugführung, entwickelt. Die Ergebnisse dieser Arbeit entstanden im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft geförderten Projekts Ko-HAF.

Für die Realisierung von Trajektorienplanung und Fahrzeugführung wird ein Modell benötigt. Da die Anforderungen an die beiden Komponenten sehr unterschiedlich sind, war es zunächst notwendig, Anforderungen abzuleiten und anhand derer ein passendes Modell zu bestimmen. Für die Trajektorienplanung fiel die Wahl auf ein Punktmassenmodell. Das Punktmassenmodell ist einerseits genau genug für die Beschreibung einer fahrbaren Trajektorie und zum anderen einfach genug, um den Rechenaufwand gering zu halten. Für die Fahrzeugführung wird eine möglichst hohe Genauigkeit benötigt, damit das Ego-Fahrzeug exakt entlang der Trajektorie geführt werden kann. Dazu wurde ein nichtlineares Einspurmodell verwendet. Anders als in vielen aktuellen Ansätzen in der Literatur wurde das Einspurmodell nicht um eine Beschreibung der Bewegung in einem globalen Koordinatensystem, sondern um eine Beschreibung der Relativbewegung zur Straße erweitert. Dadurch ist die aktuelle Seriensensorik ausreichend, um alle Systemzustände zu bestimmen, und zusätzlich entfällt die Transformation zwischen Straßenkoordinatensystem und globalem Koordinatensystem. Abschließend wurde die Dynamik der Aktoren identifiziert und sowohl das Punktmassenmodell als auch das nichtlineare Einspurmodell um die identifizierte Dynamik erweitert. Dies hat speziell für das Einspurmodell den Vorteil, dass dieses eine eingangsaffine Form annimmt. So müssen für den späteren Entwurf der Fahrzeugführung keine Vereinfachungen gemacht werden, wie es häufig in der Literatur vorzufinden ist. Abschließend wurde noch die Krümmung als zeitvarianter Parameter eingeführt, wodurch das resultierende Modell für die Fahrzeugführung einen nichtlinearen zeitvarianten Charakter erhält.

Als geeignete Struktur für das Zusammenspiel von Trajektorienplanung und Fahrzeugführung bietet sich die Kaskade an. Die Aufgabe des äußeren Kreises der Kaskade, der Trajektorienplanung, ist es, eine kollisionsfreie Trajektorie zu bestimmen. Die Trajektorienplanung regelt den Abstand zum umgebenden Verkehr. Wohingegen der unterlagerte Kreis, die Fahrzeugführung, sicherstellt, dass der Trajektorie exakt gefolgt wird.

Die Trajektorienplanung ist bereits Gegenstand vieler Untersuchungen in der Literatur, jedoch erfüllen die bestehenden Konzepte nicht die in dieser Arbeit gestellten Anforderungen. Die Kon-

zepte beschäftigen sich entweder nur mit einem Teilaspekt der Autobahnfahrt oder sind z. B. nicht in der Lage, einen Fahrstreifenwechsel zu planen, der in der Zukunft beginnt. Der in dieser Arbeit entwickelte Trajektorienplaner setzt an dieser Stelle an. Er kombiniert zwei Konzepte aus der Literatur und erweitert diese, so dass insgesamt ein vollständiges Konzept zu kombinierten Längs- und Querplanung für Autobahnfahrten entsteht: Der Trajektorienplaner plant zunächst eine Schar von Längstrajektorien, die paarweise mit einer Schar aus Quertrajektorien kombiniert werden. Aus dieser Menge wird mit Hilfe einer Gütefunktion die beste kollisionsfreie Trajektorie ausgewählt. Bei der Wahl des Lösungsverfahrens wurde besonders darauf geachtet, dass keine Drittsoftware benötigt wird und das Verfahren somit plattformunabhängig ist. Um eine möglichst genaue Prädiktion des rückwärtigen Verkehrs zu erhalten, wurden verschiedene Prädiktionsmodelle untersucht. Dabei zeigte sich, dass Modelle, die eine Reaktion auf die Bewegung des Ego-Fahrzeugs abbilden können, rein physikalischen Modellen überlegen sind. Abschließend wurde der Trajektorienplaner um ein Konzept zum Fahrstreifenwechselabbruch ergänzt. Dieses entscheidet in kritischen Situationen anhand einer Metrik, ob die Fortsetzung oder der Abbruch des Fahrstreifenwechsels das sicherere Manöver ist.

Für die Fahrzeugführung wurden zwei Konzepte ausgewählt, die einen konstruktiven Entwurf für das nichtlineare zeitvariante Einspurmodell ermöglichen. Beide Konzepte basieren auf einer Struktur mit zwei Freiheitsgraden, die die Fahrzeugführung in eine Vorsteuerung und eine Folgeregelung aufteilt. Um den Entwurf des Folgereglers zu vereinfachen, ist die grundlegende Idee beider Methoden, das nichtlineare Modell zunächst in ein lineares Modell zu überführen und anhand dessen den Folgeregler zu entwerfen. Das erste Konzept, die Exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung, erzielt das lineare Ein-/Ausgangsverhalten durch Kompensation der Nichtlinearitäten. Das zweite Konzept, die Nichtlineare Vorsteuerung mit zeitvarianter Regelung, hingegen verwendet eine Jaccobi-Linearisierung, um das nichtlineare Modell entlang der Trajektorie zu linearisieren. Ein wesentliches Merkmal beider Konzepte ist, dass sie für den gesamten in dieser Arbeit betrachteten Arbeitsbereich gültig sind, d. h. von 0 – 130 km/h. Dadurch benötigen sie nur eine geringe Anzahl an Parametern, und der Kalibrieraufwand ist gering. Dies ist vor allem in Bezug auf einen möglichen Einsatz in verschiedenen Serienfahrzeugen ein großer Vorteil.

Zur Validierung der Trajektorienplanung und Fahrzeugführung wurden diese prototypisch in einem Fahrzeug umgesetzt und erfolgreich im Rahmen der Ko-HAF-Abschlussveranstaltung einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt. Bei den Versuchsfahrten stellte sich heraus, dass die beiden Komponenten, die an sie gestellten Anforderungen zufriedenstellend erfüllen. Beide Konzepte zur Fahrzeugführung zeigten ein vergleichbar gutes Trajektorienfolgeverhalten. Speziell das Folgeverhalten in Längsrichtung zeigte hervorragende Ergebnisse.

Ausblick

Die erzielten Ergebnisse machen einen sehr vielversprechenden Eindruck bezüglich der Praxistauglichkeit der entwickelten Komponenten. Allerdings konnten bisher lediglich Versuchsfahrten auf einem Testgelände durchgeführt werden. Auf dem Testgelände war es nicht möglich, beliebige Verkehrssituationen nachzustellen und zudem wurden allen Testfahrern bestimmte Anweisungen

gegeben, wie sie sich verhalten sollten. Der nächste konsequente Schritt ist es somit, die entwickelten Komponenten unter realen Verkehrsbedingungen zu validieren.

Ein weiterer offener Punkt ist die fehlende Berücksichtigung von Schaltvorgängen des Automatikgetriebes. Dies kann besonders bei hohen Geschwindigkeiten dazu führen, dass das Fahrzeug genau zu Beginn eines Beschleunigungsvorgangs bis zu zwei Gänge nach unten schaltet. Dadurch steht kein Antriebsmoment zur Verfügung und der Trajektorienfolgefehler kann kurzzeitig klar über den Grenzwert hinaus ansteigen. Um dies zu umgehen, ist es vorstellbar, in bestimmten Situationen einen geeigneten Gang aus der Trajektorie abzuleiten und rechtzeitig auf diesen umzuschalten. Der Nachteil dieser Lösung ist jedoch, dass dies für jeden Fahrzeugtyp und Motorentyp individuell eingestellt werden muss. Eine bessere Lösung wäre es, diese Funktionalität direkt auf dem Steuergerät des Automatikgetriebes umzusetzen und eine Schnittstelle bereitzustellen, an die eine Trajektorie übergeben werden kann.

Bei der Einteilung der drei Handlungsebenen in Abschnitt 1.1 wurde die Annahme getroffen, dass der Informationsfluss von der Fahrstrategie zur Trajektorienplanung nur in eine Richtung stattfindet und die beiden Komponenten unabhängig voneinander entworfen werden können. Diese Annahme ist grundsätzlich nicht falsch und war im für die Ko-HAF-Abschlusspräsentation auch vollkommen ausreichend. Um die Genauigkeit der Prädiktion des eigenen Fahrzeugs innerhalb der Fahrstrategie zu erhöhen, ist es jedoch sinnvoll, das Wissen über die Art und Weise, wie die Trajektorien geplant werden, in die Fahrstrategie zu integrieren. Aufgrund des begrenzten Rechenaufwands ist es nicht möglich, für jedes in der Fahrstrategie berücksichtigte Manöver mit Hilfe des Trajektorienplaners eine Trajektorie zu generieren. Deshalb wäre es interessant zu untersuchen, wie geeignete Möglichkeiten aussehen können, die eine vereinfachte Form des Trajektorienplaners in die Fahrstrategie integrieren. Ein erster Lösungsansatz hierfür wurde bereits in [Augustin, Schucker u. a., 2019] vorgestellt.

Anhang

A.1 Gleichungen des vollständigen Fahrzeugmodells zur Fahrzeugführung

$$\dot{d} = v \sin(\psi_t + \beta) \quad (\text{A.1a})$$

$$\dot{\psi}_t = \dot{\psi} - v \cos(\psi_t + \beta) \kappa(t) \quad (\text{A.1b})$$

$$\ddot{\psi} = \frac{-c_{\alpha,h} \left(\arctan \left(\frac{l_h \dot{\psi} - v \sin \beta}{v \cos \beta} \right) \right) l_h + c_{\alpha,f} \left(\delta - \arctan \left(\frac{l_f \dot{\psi} + v \sin \beta}{v \cos \beta} \right) \right) l_f \cos(\delta) + \dots}{I_z} + \frac{F_{x,f} l_f \sin(\delta)}{I_z} \quad (\text{A.1c})$$

$$\dot{\beta} = -\dot{\psi} + \frac{c_{\alpha,f} \left(\delta - \arctan \left(\frac{l_f \dot{\psi} + v \sin \beta}{v \cos \beta} \right) \right) \cos(\delta - \beta) + F_{x,f} \sin(\delta - \beta) + \dots}{mv} + \frac{c_{\alpha,h} \left(\arctan \left(\frac{l_h \dot{\psi} - v \sin \beta}{v \cos \beta} \right) \right) \cos(\beta) - F_{x,h} \sin(\beta)}{mv} \quad (\text{A.1d})$$

$$\dot{v} = \frac{-c_{\alpha,f} \left(\delta - \arctan \left(\frac{l_f \dot{\psi} + v \sin \beta}{v \cos \beta} \right) \right) \sin(\delta - \beta) + F_{x,f} \cos(\delta - \beta) + \dots}{m}$$

$$\frac{c_{\alpha,h} \left(\arctan \left(\frac{l_h \dot{\psi} - v \sin \beta}{v \cos \beta} \right) \right) \sin(\beta) + F_{x,h} \cos(\beta)}{m} \quad (\text{A.1e})$$

$$\dot{\delta} = \dot{\delta} \quad (\text{A.1f})$$

$$\ddot{\delta} = -2D_1 \omega_1 \dot{\delta} - \omega_1^2 \delta \quad (\text{A.1g})$$

$$\dot{F}_x = \dot{F}_x \quad (\text{A.1h})$$

$$\ddot{F}_x = -2D_{\text{bm}} \omega_{\text{bm}} \dot{F}_x - \omega_{\text{bm}}^2 F_x \quad (\text{A.1i})$$

A.2 Herleitung der Lösung für das unbeschränkte Optimalsteuerungsproblem

Die Herleitung basiert auf Rathgeber [2016].

1. Aufstellen der Hamilton-Funktion für das Optimalsteuerungsproblem (3.4) unter Verwendung der Lagrange-Multiplikatoren $\lambda = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3 \ \lambda_4]'$:

$$H(\chi, u, \lambda, t) = \frac{1}{2}u^2 + \lambda' \tilde{\mathbf{f}}(\chi, u, t) \quad (\text{A.2a})$$

$$= \frac{1}{2}u^2 + \lambda_1 \chi_2 + \lambda_2 \chi_3 + \lambda_3 \chi_4 + \lambda_4 u \quad (\text{A.2b})$$

2. Bestimmen der Optimalitätsbedingungen erster Ordnung:

$$\dot{\lambda} = -\frac{\partial H}{\partial \chi} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_1 \\ \dot{\lambda}_2 \\ \dot{\lambda}_3 \\ \dot{\lambda}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\lambda_1 \\ -\lambda_2 \\ -\lambda_3 \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

$$\frac{\partial H}{\partial u} = u + \lambda_4 \stackrel{!}{=} 0 \Rightarrow u = -\lambda_4 \quad (\text{A.4})$$

3. Bestimmen der Funktionen für $\lambda_{(.)}$ aus (A.3):

$$\lambda_1 = 5040c_7 = \text{konstant (frei wählbar)} \quad (\text{A.5a})$$

$$\lambda_2 = -5040c_7 t - 720c_6 \quad (\text{A.5b})$$

$$\lambda_3 = 2520c_7 t^2 + 720c_6 t + 120c_5 \quad (\text{A.5c})$$

$$\lambda_4 = -840c_7 t^3 - 360c_6 t^2 - 120c_5 t - 24c_4 \quad (\text{A.5d})$$

Die Faktoren vor den Konstanten (5040, 720, ...) wurden so gewählt, dass Gleichung (A.6b) frei von solchen Faktoren ist.

4. Einsetzen von (A.4) in (2.19):

$$\dot{\chi}_4 = u = -\lambda_4 = 840c_7 t^3 + 360c_6 t^2 + 120c_5 t + 24c_4 \quad (\text{A.6a})$$

$$\vdots$$

$$\chi_1 = c_7 t^7 + c_6 t^6 + c_5 t^5 + c_4 t^4 + c_3 t^3 + c_2 t^2 + c_1 t^1 + c_0 \quad (\text{A.6b})$$

A.3 Weitere Ergebnisse der Prototypischen Umsetzung

In diesem Abschnitt werden zwei weitere Szenarien präsentiert. Die beiden Szenarien stellen keine typischen Autobahnmanöver dar. Sie dienen dazu, die Leistungsfähigkeit der entwickelten Konzepte zu verdeutlichen. Dabei wird zum einen gezeigt, dass die Konzepte zur Fahrzeugführung über den gesamten Arbeitsbereich gültig sind. Zum anderen stellen sie die Leistungsfähigkeit der beiden Fahrzeugführungskonzepte bei großen Längsbeschleunigungen dar.

A.3.1 Szenario 4: Schrittweise Absenkung der Geschwindigkeit

Szenario 4 beschreibt eine schrittweise Absenkung der Geschwindigkeit von 33,3 m/s (120 km/h) auf 0 m/s in Schritten von 8,3 m/s (30 km/h). Bild A.1 zeigt die Messergebnisse. Sowohl EEAL

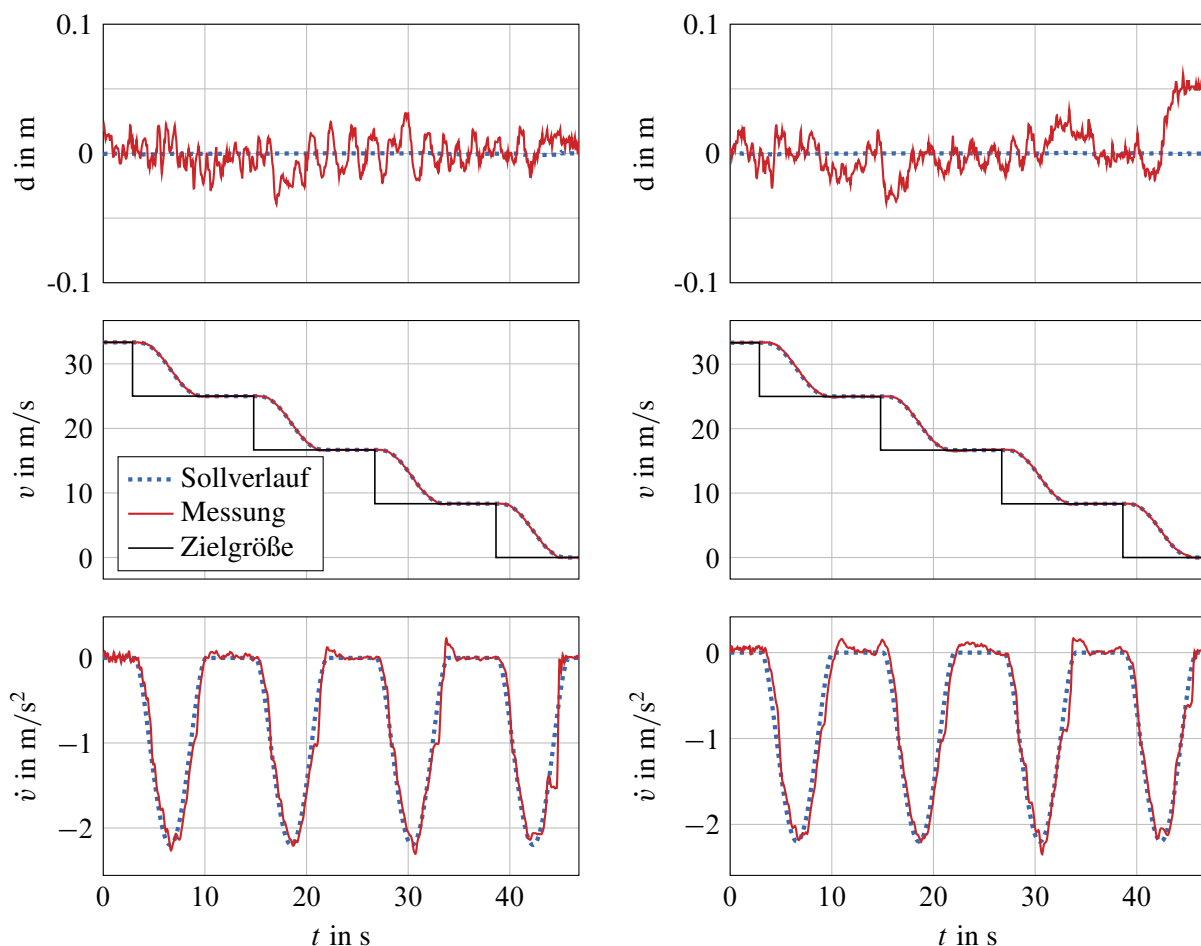


Bild A.1: Messergebnisse für Szenario 4: EEAL (links) und NVZR (rechts)

als auch NVZR können der Geschwindigkeit exakt folgen und auch die Querführung entlang der Fahrstreifenmitte zeigt sehr gute Ergebnisse über den gesamten Geschwindigkeitsbereich. Lediglich die NVZR zeigt für sehr geringe Geschwindigkeiten eine kleine Abnahme in ihrer Leistungsfähigkeit. Betrachtet man die Trajektorienfolgefehler in Bild A.2 ist gut zu erkennen, dass die

Fehler sich innerhalb der vorgegebenen Grenzen bewegen. Lediglich der NVZR zeigt einen kurzen Ausreißer bei der ersten Verzögerung. Dies ist für eine dynamische Phase aber noch innerhalb der Anforderungen.

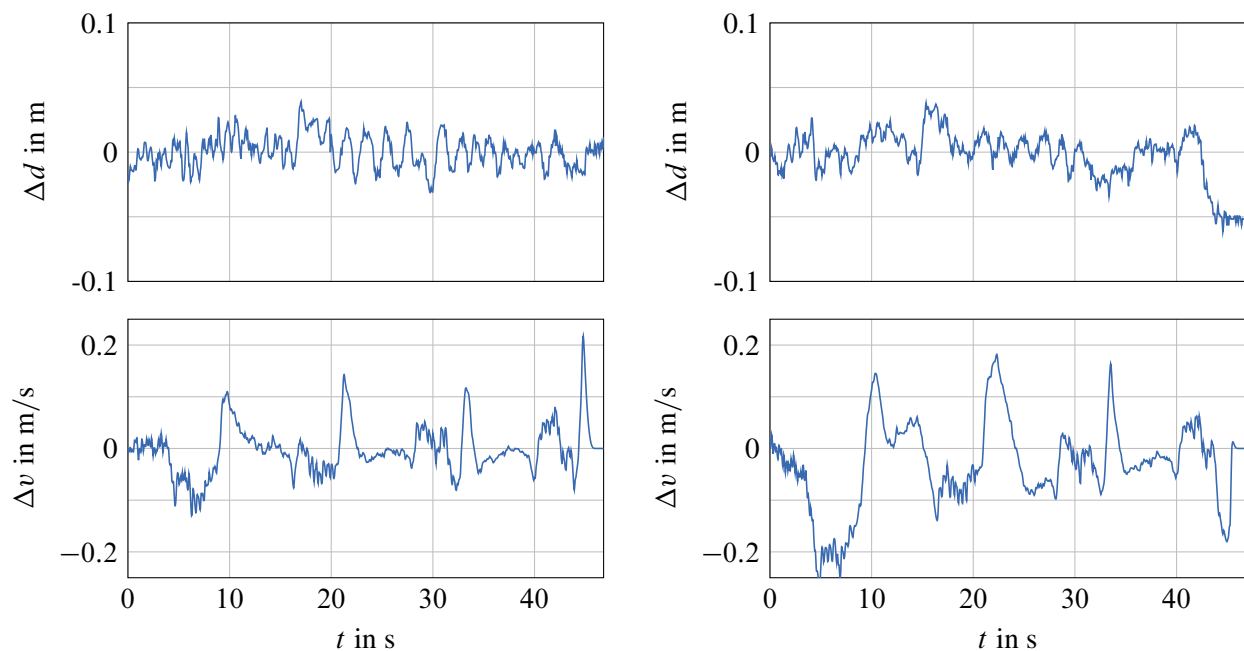


Bild A.2: Trajektorienfolgefehler für Szenario 4: EEAL (links) und NVZR (rechts)

A.3.2 Szenario 5: Schrittweise Erhöhung der Geschwindigkeit

In diesem Szenario wird die Geschwindigkeit im Gegensatz zu Szenario 4 in 8,3 m/s (30 km/h) Schritten auf 33,3 m/s (120 km/h) erhöht. Da sich die automatisierte Fahrfunktion nicht im Stillstand aktivieren lässt, entfällt der erste Schritt und das Szenario beginnt direkt bei 30 km/h. Anders als bei Szenario 4 verwendet der Trajektorieplaner in Szenario 5 den dreistufigen Beschleunigungsvorgang, siehe Bild A.3, da die maximale Beschleunigung deutlich geringer ist als die maximale Verzögerung. Beide Fahrzeugführungskonzepte können der geplanten Geschwindigkeitstrajektorie auch in diesem Szenario exakt folgen und das Fahrzeug gleichzeitig exakt entlang der Fahrstreifenmitte führen. Betrachtet man die Trajektorienfolgefehler in Bild A.4, so befinden sich diese klar innerhalb der geforderten Grenzen. Auffällig ist dabei, dass Trajektorienfolgefehler in Längsrichtung im Vergleich zu Szenario 4 deutlich geringer sind. Ein Grund hierfür könnte die in Kapitel 2.7.3 getroffene Vereinheitlichung der Dynamik der Aktoren von Motor und Bremse sein. Diese wurde leicht zugunsten des Motors gewählt.

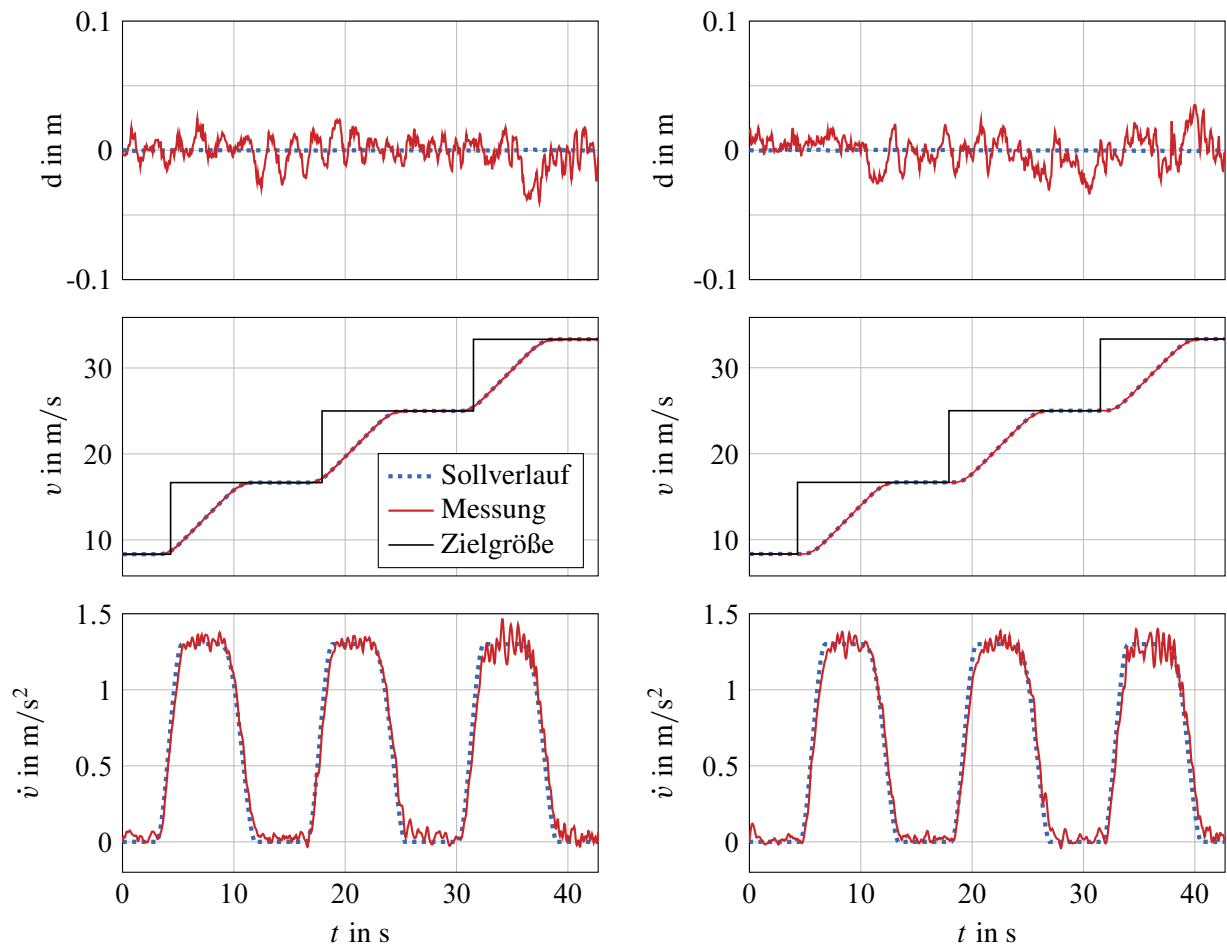


Bild A.3: Messergebnisse für Szenario 5: EEAL (links) und NVZR (rechts)

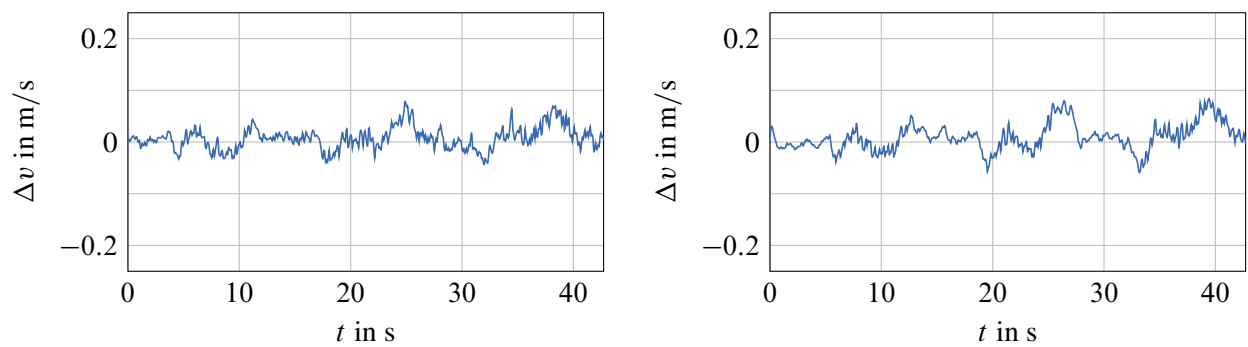


Bild A.4: Trajektorienfolgefehler für Szenario 5: EEAL (links) und NVZR (rechts)

Literaturverzeichnis

[Adamy, 2014] J. Adamy. *Nichtlineare Systeme und Regelungen*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.

[Aeberhard, Rauch u. a., 2015] M. Aeberhard, S. Rauch, M. Bahram, G. Tanzmeister, J. Thomas, Y. Pilat, F. Homm, W. Huber und N. Kaempchen. *Experience, results and lessons learned from automated driving on Germany's highways*. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 7.1 (2015), S. 42–57.

[Allgöwer und Gilles, 1993] F. Allgöwer und E. D. Gilles. *Nichtlinearer Reglerentwurf auf der Grundlage exakter Linearisierungstechniken*. In: *VDI Berichte: Nichtlineare Regelung: Methoden, Werkzeuge, Anwendungen* 1993.1026 (1993).

[Athans und Falb, 1966] M. Athans und P. L. Falb. *Optimal Control: An introduction to its theory and its applications*. 1. Aufl. Lincoln Laboratory publications. Mineola, NY: McGraw-Hill und Dover Publ, 1966.

[Bahadorian, Eaton u. a., 2014] M. Bahadorian, R. Eaton, T. Hesketh und B. Savkovic. *Robust time-varying model predictive control with application to mobile robot unmanned path tracking*. In: *IFAC World Congress Proceedings* 47.3 (2014), S. 4849–4854.

[Bechtloff, 2018] J. P. Bechtloff. *Schätzung des Schwimmwinkels und fahrdynamischer Parameter zur Verbesserung modellbasierter Fahrdynamikregelungen*. Bd. 1249. Berichte aus dem Institut für Automatisierungstechnik der TU Darmstadt. Düsseldorf: VDI Verlag, 2018.

[Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2013-03-06] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. *Straßenverkehrs-Ordnung: StVO*. 2013-03-06.

[Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2013-03-14] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. *Verordnung über die Erteilung einer Verwarnung, Regelsätze für Geldbußen und die Anordnung eines Fahrverbotes wegen Ordnungswidrigkeiten im Straßenverkehr (Bußgeldkatalog-Verordnung): BKatV*. 2013-03-14.

[Castillo, 1991] B. Castillo. *Output tracking through singular points for a class of nonlinear systems*. In: *IFAC European Control Conference (ECC) Proceedings*. 1991, S. 1496–1500.

[Deutscher, 2012] J. Deutscher. *Zustandsregelung verteilt-parametrischer Systeme*. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.

[Deutsches Institut für Normung e. V., Nov. 2013] Deutsches Institut für Normung e. V. *DIN ISO 8855: Straßenfahrzeuge – Fahrdynamik und Fahrverhalten – Begriffe*. Nov. 2013.

- [**Dickmanns, 1995**] E. D. Dickmanns. *Dynamic Vision: Long distance drive VaMP 1995*. 1995. URL: <http://www.dyna-vision.de/main/A.3.8%20Long%20distance%20drive%20VaMP%201995.html> (besucht am 01.04.2019).
- [**Dickmanns, Behringer u. a., 1994**] E. D. Dickmanns, R. Behringer, D. Dickmanns, T. Hildebrandt, M. Maurer, F. Thomanek und J. Schiehlen. *The seeing passenger car 'VaMoRs-P'*. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) Proceedings*. 1994, S. 68–73.
- [**Evestedt, Ward u. a., 2016**] N. Evestedt, E. Ward, J. Folkesson und D. Axehill. *Interaction aware trajectory planning for merge scenarios in congested traffic situations*. In: *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) Proceedings*. 2016, S. 465–472.
- [**Falb und Wolovich, 1967**] P. L. Falb und W. A. Wolovich. *Decoupling in the design and synthesis of multivariable control systems*. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 12 (1967), S. 651–659.
- [**Föllinger, Konigorski u. a., 2016**] O. Föllinger, U. Konigorski, B. Lohmann, G. Roppenecker und A. Trächtler. *Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*. 12., überarb. Aufl. Berlin und Offenbach: VDE Verlag, 2016.
- [**Freund, 1971**] E. Freund. *Zeitvariable Mehrgrößensysteme*. Bd. 57. Lecture Notes in Operations Research and Mathematical Systems, Economics, Computer Science, Information and Control. Berlin und Heidelberg: Springer, 1971.
- [**Fuchshumer, 2005**] S. Fuchshumer. *Algebraic linear identification, modelling, and applications of flatness-based control*. Dissertation. Linz: Johannes Kepler Universität, 2005.
- [**Germann, 1997**] S. Germann. *Modellbildung und modellgestützte Regelung der Fahrzeuglängsdynamik: Dissertation*. Bd. 309. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997.
- [**Gipps, 1981**] P. G. Gipps. *A behavioural car-following model for computer simulation*. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 15.2 (1981), S. 105–111.
- [**Graichen, 2012**] K. Graichen. *Methoden der Optimierung und optimalen Steuerung: Wintersemester 2012/2013*. Ulm, 2012. URL: https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni-ulm/iui.inst.110/Downloads/Vorlesung/Optimierung/Skript/Skript_MOOS_WS1213.pdf (besucht am 01.04.2019).
- [**Gutjahr, Gröll u. a., 2017**] B. Gutjahr, L. Gröll und M. Werling. *Lateral vehicle trajectory optimization using constrained linear time-varying MPC*. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 18.6 (2017), S. 1586–1595.
- [**Hahn, 2017**] S. Hahn. *Methoden zur nichtlinearen modellbasierten Spurführung benutzerdefinierter Punkte an der Fahrzeugfront*. Berichte aus der Steuerungs- und Regelungstechnik. Herzogenrath: Shaker, 2017.
- [**Hansen, 2018**] T. Hansen. *Kombinierte Längs- und Quertrajektorienplanung für automatisierte Fahrstreifenwechsel*. Dissertation. Darmstadt: TU Darmstadt, 2018.

- [Hansen, Schulz u. a., 2017] T. Hansen, M. Schulz, M. Knoop und U. Konigorski. *Kombinierte Längs- und Quertrajektorienplanung für automatisierte Fahrstreifenwechsel*. In: *AUTOREG*. VDI-Berichte. Düsseldorf: VDI Verlag, 2017, S. 235–246.
- [Hansen, Schulz u. a., 2016] T. Hansen, M. Schulz, M. Knoop und U. Konigorski. *Trajektorienplanung für automatisierte Fahrstreifenwechsel*. In: *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift* 118.7–8 (2016), S. 66–71.
- [Harr, 2019] M. Harr. *Fail-safe vehicle pose estimation in lane-level maps using pose graph optimization*. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2019.
- [Helbing, Hennecke u. a., 1999] D. Helbing, A. Hennecke und M. Treiber. *Phase diagram of traffic states in the presence of inhomogeneities*. In: *Physical Review Letters* 82.21 (1999), S. 4360–4363.
- [Hirschorn, 1979] R. M. Hirschorn. *Invertibility of nonlinear control systems*. In: *SIAM Journal on Control and Optimization* 17.2 (1979), S. 289–297.
- [Hoedt, 2013] J. Hoedt. *Fahrdynamikregelung für fehlertolerante X-By-Wire-Antriebstopologien*. Dissertation. TU Darmstadt, 2013.
- [Horowitz, 1963] I. M. Horowitz. *Synthesis of Feedback Systems*. 1. Aufl. Burlington: Elsevier Science, 1963.
- [Isermann, 2006] R. Isermann, Hrsg. *Fahrdynamik-Regelung: Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik*. 1. Aufl. Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2006.
- [Isidori, 1995] A. Isidori. *Nonlinear control systems*. 3. Aufl. Communications and control engineering series. London: Springer, 1995.
- [Khalil, 2002] H. K. Khalil. *Nonlinear systems*. 3. Aufl. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- [Kong, Pfeiffer u. a., 2015] J. Kong, M. Pfeiffer, G. Schildbach und F. Borrelli. *Kinematic and dynamic vehicle models for autonomous driving control design*. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) Proceedings*. 2015, S. 1094–1099.
- [Kranz, Hahn u. a., 2016] T. Kranz, S. Hahn und K. Zindler. *Nonlinear lateral vehicle control in combined emergency steering and braking maneuvers*. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) Proceedings*. 2016, S. 603–610.
- [Levinson, Askeland u. a., 2011] J. Levinson, J. Askeland, J. Becker und J. Dolson. *Towards fully autonomous driving: systems and algorithms*. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) Proceedings*. 2011, S. 163–168.
- [Lien und Wang, 1990] C.-Y. Lien und T.-W. Wang. *Application of feedback linearization to bioreactor control*. In: *IEEE American Control Conference (ACC) Proceedings*. 1990, S. 2161–2166.

- [**Massera Filho, Wolf u. a., 2014**] C. Massera Filho, D. Wolf, V. Grassi JR und F. Osorio. *Longitudinal and Lateral Control for Autonomous Ground Vehicles*. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) Proceedings*. 2014, S. 588–593.
- [**Mayr, 1991**] R. Mayr. *Verfahren zur Bahnfolgeregelung für ein automatisch geführtes Fahrzeug*. Dissertation. Dortmund: Universität Dortmund, 1991.
- [**Menhour, D’Andréa-Novel u. a., 2014**] L. Menhour, B. D’Andréa-Novel, M. Fliess und H. Mounier. *Coupled nonlinear vehicle control: Flatness-based setting with algebraic estimation techniques*. In: *Control Engineering Practice* 22 (2014), S. 135–146.
- [**Mitschke, 2005**] M. Mitschke. *Das Einspurmodell von Riekert-Schunck*. In: *ATZ-Automobil-technische Zeitschrift* 107.11 (2005), S. 1030–1031.
- [**Mitschke und Wallentowitz, 2014**] M. Mitschke und H. Wallentowitz. *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. 5., überarb. u. erg. Aufl. VDI-Buch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [**Nilsson, Silvin u. a., 2016**] J. Nilsson, J. Silvin, M. Brannstrom, E. Coelingh und J. Fredriksson. *If, when, and how to perform lane change maneuvers on highways*. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 8.4 (2016), S. 68–78.
- [**Pacejka, 2006**] H. B. Pacejka. *Tyre and vehicle dynamics*. 2. Aufl. Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2006.
- [**Papageorgiu, Leibold u. a., 2015**] M. Papageorgiu, M. Leibold und M. Buss. *Optimierung: Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*. 4., korr. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2015.
- [**Rajamani, 2012**] R. Rajamani. *Vehicle dynamics and control*. 2. Aufl. Mechanical engineering series. New York: Springer, 2012.
- [**Rathgeber, 2016**] C. Rathgeber. *Trajektorienplanung und -folgeregelung für assistiertes bis hochautomatisiertes Fahren*. Dissertation. Berlin: TU Berlin, 2016.
- [**Rathgeber, Winkler u. a., 2016**] C. Rathgeber, F. Winkler und S. Müller. *Kollisionsfreie Längs- und Quertrajektorienplanung unter Berücksichtigung fahrzeugspezifischer Potenziale*. In: *at – Automatisierungstechnik* 64.1 (2016), S. 61–76.
- [**Riekert und Schunck, 1940**] P. Riekert und T. E. Schunck. *Zur Fahrmechanik des gummibereiften Kraftfahrzeugs*. In: *Ingenieur Archiv* 11.3 (1940), S. 210–224.
- [**SAE International, 2018**] SAE International. *SAE Standard J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. 2018.
- [**Schildbach und Borrelli, 2015**] G. Schildbach und F. Borrelli. *Scenario model predictive control for lane change assistance on highways*. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) Proceedings*. 2015, S. 611–616.

- [Schorn, 2007] M. Schorn. *Quer- und Längsregelung eines Personenkraftwagens für ein Fahrerassistenzsystem zur Unfallvermeidung*. Bd. 651. Berichte aus dem Institut für Automatisierungstechnik der TU Darmstadt. Düsseldorf: VDI Verlag, 2007.
- [Schouwenaars, 2005] T. Schouwenaars. *Safe trajectory planning of autonomous vehicles*. Dissertation. Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [Stanchev, 2017] R. Stanchev. *Ein neuer Ansatz zur Zustandsraumdarstellung, Systemanalyse und Regelung von Drei-Wege-Autoabgaskatalysatoren*. Berichte aus dem Institut für Automatisierungstechnik der TU Darmstadt. Düsseldorf: VDI Verlag, 2017.
- [Statistisches Bundesamt, 2018] Statistisches Bundesamt. *Unfallentwicklung auf deutschen Straßen 2017*. 2018.
- [Statistisches Bundesamt, 2019] Statistisches Bundesamt. *Verkehr: Verkehrsunfälle*. 2019.
- [Takahashi, Hongo u. a., 1989] A. Takahashi, T. Hongo, Y. Ninomiya und G. Sugimoto. *Local path planning and motion control for AGV in positioning*. In: *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS) Proceedings* (1989), S. 392–397.
- [Tian, Jiang u. a., 2016] J. Tian, R. Jiang, G. Li, M. Treiber, B. Jia und C. Zhu. *Improved 2D intelligent driver model in the framework of three-phase traffic theory simulating synchronized flow and concave growth pattern of traffic oscillations*. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 41 (2016), S. 55–65.
- [Treiber, Hennecke u. a., 2000] M. Treiber, A. Hennecke und D. Helbing. *Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations*. In: *Physical review E* 62.2 (2000), S. 1805–1824.
- [VDA, 2015] VDA. *Automatisierung: Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren*. Hrsg. von VDA – Verband der Automobilindustrie e. V. 2015.
- [Werling, 2011] M. Werling. *Ein neues Konzept für die Trajektoriengenerierung und -stabilisierung in zeitkritischen Verkehrsszenarien*. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2011.
- [Werling, Gröll u. a., 2010] M. Werling, L. Gröll und G. Bretthauer. *Invariant trajectory tracking with a full-size autonomous road vehicle*. In: *IEEE Transactions on Robotics* 26.4 (2010), S. 758–765.
- [Werling, Kammel u. a., 2012] M. Werling, S. Kammel, J. Ziegler und L. Gröll. *Optimal trajectories for time-critical street scenarios using discretized terminal manifolds*. In: *The International Journal of Robotics Research* 31.3 (2012), S. 346–359.
- [Werling, Ziegler u. a., 2010] M. Werling, J. Ziegler, S. Kammel und S. Thrun. *Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a frenet frame*. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) Proceedings*. 2010, S. 987–993.

[Ziegler, Bender u. a., 2014] J. Ziegler, P. Bender, T. Dang und C. Stiller. *Trajectory planning for BERTHA – A local, continuous method*. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) Proceedings*. 2014, S. 450–457.

[Ziegler, Dang u. a., 2014] J. Ziegler, T. Dang, U. Franke und H. Lategahn. *Making Bertha drive – An autonomous journey on a historic route*. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 6 (2014), S. 8–20.

Eigene Veröffentlichungen

[Augustin, Schucker u. a., 2019] D. Augustin, J. Schucker, J. Tschirner, M. Hofmann und U. Konigorski. *A simulation-based reinforcement learning approach for long-term maneuver planning in highway traffic scenarios*. In: *AUTOREG*. VDI-Berichte. Düsseldorf: VDI Verlag, 2019, S. 47–60.

[Schucker und Hoffmann, 2017] J. Schucker und P. Hoffmann. *Nonlinear control methods for combined lateral and longitudinal control*. In: *AmE 2017 – Automotive meets Electronics; 8th GMM-Symposium*. Berlin, Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2017, S. 20–25.

[Schucker und Konigorski, 2019a] J. Schucker und U. Konigorski. *A complete concept for combined longitudinal and lateral trajectory planning for automated driving on highways*. In: *AUTOREG*. VDI-Berichte. Düsseldorf: VDI Verlag, 2019, S. 271–282.

[Schucker und Konigorski, 2019b] J. Schucker und U. Konigorski. *Linear time-variant vehicle trajectory guidance with nonlinear inversion-based feedforward control*. In: *IFAC-Papers-OnLine: IFAC International Symposium on Advances in Automotive Control (AAC) Proceedings 52.5* (2019), S. 378–384.

[Schucker und Konigorski, 2018] J. Schucker und U. Konigorski. *Nonlinear Vehicle Trajectory Guidance for Automated Driving on Highways*. In: *IFAC-PapersOnLine: IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO) Proceedings 51.22* (2018), S. 262–267.